

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЗАПОРІЗЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Вишнепольський Євген Валерійович

УДК 67.02:621.787.4:621.762.8

**ДИСЕРТАЦІЯ
ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ДЕТАЛЕЙ ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ,
ОТРИМАНИХ СЕЛЕКТИВНИМ ЛАЗЕРНИМ СПІКАННЯМ, ШЛЯХОМ
АЛМАЗНОГО ВИГЛАДЖУВАННЯ**

05.02.08 Технологія машинобудування

131 Прикладна механіка

13 Механічна інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

 Євген ВИШНЕПОЛЬСЬКИЙ

Науковий керівник

Павленко Дмитро Вікторович
доктор технічних наук, професор

Ідентичність всіх примірників дисертації

ЗАСВІДЧУЮ:

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради, к.т.н., доц.

Юрій ШОЛОВІЙ

Львів – 2023

АНОТАЦІЯ

Вишнепольський Є.В. Підвищення якості деталей газотурбінних двигунів, отриманих селективним лазерним спіканням, шляхом алмазного вигладжування. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 131 – Прикладна механіка – Національний університет «Запорізька політехніка», МОН України, Запоріжжя, 2023.

Дисертацію присвячено вирішенню важливого науково-технічного завдання щодо розширення сфери застосування адитивних технологій та підвищення якості поверхневого шару деталей, виготовлених з нікелевих сплавів та сплавів на основі алюмініду титану, отриманих за допомогою селективного лазерного спікання.

В дисертаційній роботі вперше на основі наукового підходу виконано аналіз літературних джерел та відомих досліджень, присвячених визначенню впливу на якість деталі конструктивних концентраторів напружень, обґрунтовано застосування алмазного вигладжування для покращення їх поверхневого шару. Виконано оцінку теоретичних та практичних підходів щодо застосування алмазного вигладжування для зміцнення конструктивних концентраторів напружень деталей, отриманих за допомогою традиційних та адитивних технологій насамперед селективного лазерного спікання. Визначено закономірності формування якості поверхневого шару деталей, виготовлених із сплаву ЭП609-Ш, після алмазного вигладжування та його вплив на опір втомі від застосовування даної технології зміцнення. Встановлені закономірності у формуванні якості раціонального поєднання режимних параметрів зміцнення при обробці конструктивних концентраторів напружень деталей, виготовлених із сплаву INCONEL 718 та сплаву на основі алюмініду титану OX45-3ODS, на підставі комплексного дослідження характеристик поверхневого шару і впливу на них технологічних чинників алмазного вигладжування у взаємозв'язку із зміною геометрії вигладжувача.

Встановлено вплив залишкової пористості деталей на ефективність алмазного вигладжування після селективного лазерного спікання сплаву на основі алюмініду титану OX45-3ODS. Визначено величину та закономірності впливу режимних параметрів алмазного вигладжування на параметри залишкової пористості.

Розроблено технологічні рекомендації щодо використання алмазного вигладжування (раціональні режими і умови обробки, геометрію інструментів і обмеження їх використання для обробки конструктивних концентраторів напружень), які дозволяють забезпечити високу якість і продуктивність при обробці поверхонь деталей ГТД літальних апаратів. Вперше розроблено спеціальне технологічне оснащення, яке дозволяє виконувати зміцнення алмазним вигладжуванням конструктивних концентраторів напружень типу «Поверхня поєднання двох діаметрів» та «Поверхня переходу отвору у площину». Розроблено оригінальний пристрій, який дозволяє виконувати алмазне вигладжування криволінійних площинних поверхонь на обробляючих центрах з ЧПК.

У першому розділі розглянуто типи основних конструктивних концентраторів напружень. Встановлено величину концентрації напружень, яку визивають конструктивні елементи деталі. Проведено аналіз впливу особливостей виготовлення деталей ГТД літальних апаратів на параметри якості поверхневого шару. Виконано аналіз актуальності застосування технології алмазного вигладжування для покращення якості конструктивних концентраторів напружень деталей ГТД літальних апаратів. Виконано аналіз проблем, які заважають розповсюдженню адитивних технологій та порошкових матеріалів в авіації та машинобудуванні, та можливі шляхи їх вирішення. Виконано аналіз можливості застосування методів поверхнево-пластичного деформування для розширення сфери застосування адитивних технологій для виробництва деталей ГТД літальних апаратів. За результатами аналізу літературних джерел сформульовано мету та задачі дослідження.

У другому розділі наведені умови та методики проведення експериментальних досліджень. Визначені геометричні параметри зразків з

конструктивними концентраторами напружень типу «Поверхня поєднання двох діаметрів» або «Поверхня переходу отвору в площину». Розроблено конструкції оригінальних пристроїв, які дозволяють виконувати зміцнення відповідних концентраторів. Розроблено конструкцію пристрою для зміцнення алмазним вигладжуванням площинних поверхонь на обробляючих центрах з ЧПК. Адаптовано методику визначення залишкових напружень за методом свердління зондувального отвору для її застосування на деталях ГТД літальних апаратів.

Третій розділ присвячено визначенню особливостей зміцнення алмазним вигладжуванням конструктивних концентраторів напружень деталей, виготовлених із жароміцного сплаву ЭП609-Ш. Досліджено вплив різного поєднання режимних параметрів алмазного вигладжування на характеристики поверхневого шару деталей, виготовлених із даного сплаву. Визначено вплив раціонального поєднання режимних параметрів на опір втомі зразків, зміцнених алмазним вигладжуванням. Виконано дослідження впливу режимних параметрів алмазного вигладжування на ефективність зміцнення конструктивних концентраторів напружень типу «Поверхня поєднання двох діаметрів» або «Поверхня переходу отвору у площину».

У четвертому розділі Запропоновано для розширення сфери застосування деталей, отриманих за допомогою селективного лазерного спікання, використовувати зміцнення поверхневого шару місць концентрації напружень алмазним вигладжуванням. Для підвищення якості деталей, виготовлених зі сплаву на основі алюмініду титану OX45-3ODS, виконано дослідження особливостей локальної поверхнево-пластичної деформації алмазним вигладжуванням зразків із зазначеного сплаву, синтезованих шляхом селективного лазерного спікання. Визначено, що для пошуку раціонального поєднання режимних параметрів, які дозволяють підвищити якість поверхневого шару, необхідно враховувати початкову пористість, яка має випадковий розподіл по площі поверхні досліджуваних зразків при їх виготовленні. Визначено, що для підвищення ефективності зміцнення сплаву на основі алюмінідів титана OX45-3ODS необхідно враховувати сукупний вплив всіх режимних параметрів вигладжування.

Встановлено закономірності зміни досліджуваних характеристик пористості залежно від різних режимних параметрів алмазного вигладжування. Визначено залежність залишкової пористості поверхневого шару деталі від геометрії інструменту, який застосовується при алмазному вигладжуванні. Встановлено раціональні режимні параметри алмазного вигладжування деталей зі сплаву на основі алюмініду титана OX45-3ODS, отриманих селективним лазерним спіканням, при яких залишкова пористість буде мінімальною. Встановлено, що для оцінки впливу режимних параметрів алмазного вигладжування на параметри залишкової пористості, необхідно використовувати узагальнений параметр пористості (П).

Досліджено особливості локальної поверхнево-пластичної деформації алмазним вигладжуванням зразків із нікелевого сплаву INCONEL 718, синтезованого шляхом селективного лазерного спікання. Встановлено, що пористість зразків з INCONEL 718 значно менша ніж пористість зразків зі сплаву на основі алюмініду титана OX45-3ODS. З метою розширення сфери застосування методу селективного лазерного спікання для виробництва деталей ГТД літальних апаратів виконано дослідження впливу режимних параметрів алмазного вигладжування на параметри якості поверхневого шару зразків із нікелевого сплаву INCONEL 718. Виконано дослідження впливу геометричних параметрів алмазних вигладжувачів на якість поверхневого шару зразків з INCONEL 718.

У п'ятому розділі виконано аналіз економічної ефективності застосування селективного лазерного спікання та алмазного вигладжування при виробництві деталей ГТД літальних апаратів. Визначено вплив раціонального поєднання режимних параметрів алмазного вигладжування на статичний запас міцності конструктивних концентраторів напружень деталей, виготовлених селективним лазерним спіканням.

Ключові слова: алмазне вигладжування, якість поверхні, конструктивні концентратори напружень, напружено-деформований стан, технологічний процес, зміцнююча обробка, селективне лазерне спікання, газотурбінний двигун, алюмінід титану.

ABSTRACT

Vyshnepolskyi E. V. Improving the quality of gas-turbine engine parts produced by selective laser sintering by means of diamond smoothing. – Qualifying scientific work as the manuscript.

Thesis for the scientific degree of Candidate of Technical Sciences in the specialty 131 - Applied Mechanics - National University "Zaporizhzhia Polytechnic", MES of Ukraine, Zaporizhzhia, 2022.

The thesis is dedicated to the solution of an important scientific and technical task regarding the production of gas turbine engine (GTE) parts of aircrafts in the aviation and rocket- space industry and expansion of the field of additive technologies application, primarily selective laser sintering.

In the thesis, for the first time, on the basis of the scientific approach the analysis of the literature sources and the known researches devoted to the definition of influence on quality parameters of structural stress concentrators was performed and the usage of diamond smoothing for their strengthening was substantiated. The evaluation of theoretical and practical approaches regarding the usage of diamond smoothing to strengthen of the structural stress concentrators of parts obtained by traditional and additive technologies, primarily selective laser sintering, was carried out. The regularities of the surface layer quality formation of the parts made of EP609 alloy after the diamond smoothing and its influence on the fatigue resistance of the used strengthening technology were determined. The regularities of the quality formation of the rational regime parameters combination of strengthening during the machining of structural stress concentrators of parts made of INCONEL 718 alloy and alloy based on titanium aluminide OX45-3ODS were established based on the integrated study of the surface layer characteristics and the influence of technological factors of diamond smoothing on them in the interaction with changes in the geometry of the smoother.

The influence on the diamond smoothing efficiency of the residual porosity after selective laser sintering of the alloy based on titanium aluminide OX45-3ODS was

established. The magnitude and regularities of the influence of the diamond smoothing parameters on the parameters of the residual porosity were determined.

Technological recommendations for the usage of diamond smoothing (rational regimes and conditions of processing, geometry of tools and restrictions of their usage for structural stress concentrators processing), that allow to ensure high quality and productivity during surfaces strengthening of GTE parts of aircrafts were formulated. For the first time, special technological equipment has been developed that allows to perform diamond smoothing of structural stress concentrators such as "Surface of two diameters combination" and "Surface of the Hole-to-Plane Transition" types. The original device has been developed that allows to perform diamond smoothing of curved planar surfaces on CNC machines.

In the first section the types of the main structural stress concentrators were examined. The value of stress concentration caused by structural elements of the parts was established. The analysis of the influence of the manufacturing features of GTE parts of aircraft on the parameters of the surface layer quality was carried out. The analysis of the relevance of using diamond smoothing to improve the quality of structural stress concentrators of GTE parts of aircraft was conducted. The analysis of the problems that hinder the spread of additive technologies and powder materials in aviation and mechanical engineering, as well as possible ways to solve them, was performed. The analysis of the possibility of using surface-plastic deformation methods to expand the field of application of additive technologies for the production of GTE parts of aircraft was carried out. Based on the results of the analysis of literary sources, the goal and objectives of the research were formulated.

The second section presents the conditions and features of experimental research. The geometrical parameters of the samples with structural stress concentrators such as "Surface of two diameters combination" or "Surface of the Hole-to-Plane Transition" types were determined. The constructions of original devices that allow to perform strengthening of the corresponding concentrators were developed. The construction of the device for strengthening by diamond smoothing of planar surfaces in CNC machining

centers was developed. The methodology of residual stresses determining by the probing hole method was adapted for its application on GTE parts of aircraft.

The third section is devoted to determining of the strengthening features by diamond smoothing of structural stress concentrators of parts made of heat-resistant EP609 alloy. The influence of different regime parameters combination of diamond smoothing on the characteristics of the surface layer of the parts made of this alloy was investigated. The influence of rational regime parameters combination on fatigue resistance of samples strengthened by diamond smoothing was determined. The study of the influence of diamond smoothing regime parameters on the strengthening efficiency of structural stress concentrators such as "Surface of two diameters combination" or "Surface of the Hole-to-Plane Transition" types were performed.

In the fourth section it was proposed to use the surface layer strengthening of stress concentration points by diamond smoothing to expand the application field of parts obtained by selective laser sintering. In order to improve the quality of parts made of alloy based on titanium aluminide OX45-3ODS, the study of the features of the local surface-plastic deformation by diamond smoothing of samples made of specified alloy, synthesized by selective laser sintering, was performed. It was determined that to find a rational combination of regime parameters that improved the quality of the surface layer it was necessary to take into account the initial porosity that had a random distribution over the surface area of the studied samples during their manufacture. It was determined that for the maximum efficiency of strengthening of the alloy based on titanium aluminide OX45-3ODS it was necessary to take into account the combined effect of all regime parameters of smoothing. The regularities of changes in the studied porosity characteristics depending on different regime parameters of diamond smoothing were established. The dependence of the surface layer residual porosity of the part on the tool geometry used during diamond smoothing was determined. Rational regime parameters of diamond smoothing of parts made of alloy on the basis of titanium aluminide OX45-3ODS, produced by selective laser sintering, at which residual porosity was minimal, were established. It was determined that to assess the influence of the regime parameters

of diamond smoothing on the parameters of residual porosity, it was sufficient to measure only the generalized porosity parameter (P).

The peculiarities of local surface-plastic deformation by diamond smoothing of nickel alloy INCONEL 718 samples synthesized by selective laser sintering were studied. It was found that the porosity of samples made of INCONEL 718 was significantly lower than the porosity of samples made of alloy based on titanium aluminide OX45-3ODS. In order to expand the application field of selective laser sintering for the production of GTE parts of aircraft, the study of the influence of diamond smoothing regime parameters on the surface layer quality parameters of nickel alloy INCONEL 718 samples was performed. The influence of different diamond smoothers sizes on the quality of the surface layer of INCONEL 718 samples was studied.

In the fifth section the analysis of economic efficiency of the usage of selective laser sintering and diamond smoothing in the production of GTE parts of aircrafts was carried out. The effect of the rational combination of the diamond smoothing regime parameters on the static safety margin of structural stress concentrators of parts produced by selective laser sintering was determined.

Keywords: diamond smoothing, surface quality, structural stress concentrators, stress-strain state, technological process, strengthening machining, selective laser sintering, gas turbine engine, titanium aluminide.

СПИСОК ОСНОВНИХ ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати

Статті у наукових фахових виданнях України

1. Вишнепольский Е.В., Богуслаев В.А., Пухальская Г.В., Гликсон І.Л. Повышение сопротивления усталости тонкостенных валов // *Вістник двигунобудування*. Запорожье, 2007. №2. С. 136 – 141.

2. 1. Вишнепольский Е.В., Пухальская Г.В., Гликсон І.Л. Повышение сопротивления усталости мест концентрации напряжений в цилиндрических оболочках алмазным выглаживанием // *Вістник двигунобудування*. Запорожье, 2009. №1. С. 90 – 94.

3. Вишнепольский Е.В., Павленко Д.В. Формирование качества поверхности деталей из сплава на основе алюминидов титана, полученных по технологии slm алмазным выглаживанием // *Вістник двигунобудування*. Запорожье, 2018. №1. С. 123 – 131.

4. Вишнепольський Є.В., Павленко Д.В., Сідоренко М.В., Писарський А.О. Методологія виміру залишкових напружень методом свердління отворів в тонкостінних складнопрофільних деталях короткоресурсних малорозмірних двигунах літальних апаратів // *Металознавство та обробка металів*. Київ, 2020. №3/58. С.9 – 11.

5. Вишнепольський Є. В., Павленко Д. В. Алмазне вигладжування деталей з некомпактних сплавів на основі алюмінідів титану // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. Харків, 2020. №3. С. 43 – 52.

6. Вишнепольский Е. В., Павленко Д. В., Двирнык Я. В. Прогнозируемые эффекты упрочнения алмазным выглаживанием деталей полученных с помощью селективного лазерного спекания // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. Харків, 2020. №4. С. 43 – 52.

Патенти України

7. Оправка для алмазного вигладжування складнопрофільних поверхонь: пат. 36340 Україна: МПК (2006) C21D7/00. № 36340; заявл. 29.04.08; опубл. 27.10.08, Бюл. №20. 4 с.

8. Пристрій для алмазного вигладжування поверхні з'єднання отвору та циліндру: пат. 63243 Україна: МПК (2011) C21D7/00. № 63243; заявл. 01.12.10; опубл. 10.10.11, Бюл. №19. 4 с.

Статті у наукових періодичних виданнях інших держав, які включені до міжнародних наукометричних баз даних:

9. Вишнепольський Є.В., Павленко Д.В. Эффективность уплотнения некомпактных сплавов алмазным выглаживанием // *НАУКА и ТЕХНИКА*. Мінськ, 2019. №18(1). С.62 – 89.

10. Vyshnepolskyi Y. et al. Parts Diamond Burnishing Process Regimes Optimization Made of INCONEL 718 Alloy via Selective Laser Sintering Method //2020 IEEE 10th International Conference Nanomaterials: Applications & Properties (NAP). – IEEE, 2020. – С. 02SAMA01 – 1 – 02SAMA01 – 5.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

11. Вишнепольский Є.В., Богуслаев В.А., Гликсон И.Л. Упрочнение кромок отверстий валов ГТД алмазным выглаживанием // Тезисы докладов международной молодежной научно-технической конференции «Молодежь в авиации: новые решения и перспективные технологии». (м. Алушта, 15 – 18 мая 2007 г). Алушта: АО «Мотор Сич», 2007. С. 180 – 182.

12. Вишнепольский Е.В., Богуслаев В.А., Пухальская Г.В., Гликсон И.Л. Оценка эффективности упрочнения тонкостенных валов алмазным выглаживанием // Тезисы докладов II международной молодежной научно-технической

конференции авиамоторостроительной отрасли «Молодежь в авиации: новые решения и перспективные технологии». (м. Алушта, 12 – 16 мая 2008 г). Алушта: АО «Мотор Сич», 2008. С. 90 – 92.

13. Вишнепольский Е.В. та ін. Снижения влияния концентрации напряжений в цилиндрических оболочках // Тезисы докладов XII международного конгресса двигателестроителей. (м. Рыбачье, 14 – 19 сентября 2007 г). Харьков: Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», 2008. С. 90 – 92.

14. Вишнепольский Е.В., Мышекоп А.С. Снижение влияния конструктивных концентраторов напряжений на сопротивление усталости тонкостенных валов ГТД // Материалы конференции VII международной научно-технической конференции молодых ученых «Проблемы энергосбережения и механизации в горнометаллургическом комплексе». (м. Кривой рог, 26 апреля 2011 г). Кривой рог: Криворожский технический университет, 2011. С. 153 – 155.

15. Вишнепольский Е.В. Повышение прочностных характеристик поверхности сопряжения отверстия и тонкостенного вала газотурбинного двигателя // Тези доповідей Десятої Всеукраїнської молодіжної науково-технічної конференції «Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї – наука - виробництво». (м. Суми, 26 – 30 жовтня 2010 р). Суми: СумДУ, 2010. С. 19 – 21.

16. Вишнепольский Е.В., Дядя С.І. Устройство для обработки и упрочнения поверхности сопряжения радиального отверстия и вала // Тези доповідей XII Всеукраїнської молодіжної науково-технічної конференції «Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї – наука - виробництво». (м. Київ, 2010 р). Київ: Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», 2012. С. 36 – 37.

17. Вишнепольский Е.В., Дядя С.І. Влияние алмазного выглаживания на макроструктуру поверхностного слоя тонкостенных валов ГТД // Збірник матеріалів Міжнародної науково-технічної конференції «Машинобудування України очима молодих». (м. Кременчук, 2013 р). Кременчук: КрНУ ім. Михайла Остроградського, 2013. С. 45 – 46.

18. Вишнепольский Е.В., Дядя С.І. Проблемы формирования поверхности отверстий на валах ГТД под последующее алмазное выглаживания // Тези доповідей XIV Всеукраїнської молодіжної науково-технічної конференції «Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї – наука - виробництво». (м. Суми, 27 – 31 жовтня 2014 р). Суми: СумДУ, 2014. С. 18 – 19.

19. Вишнепольский Е.В. Применение алмазного выглаживания для обработки материалов различных классов // Тезисы докладов XI Международные молодежные научно-технические чтения им. А.Ф. Можайского. (г. Запорожье, 14 – 17 мая 2018 г.) Запорожье: АО «Мотор Сич», 2018. С. 172 – 174.

20. Вишнепольский Е.В., Дядя С.І. Методичне забезпечення дослідження процесу обробки радіальних та фланцевих отворів на валах ГТД. Прогресивні технології в машинобудуванні : збірник наукових праць III Всеукраїнської науково-технічної конференції, (м. Львів 2 – 6 лютого 2015 р.) Львів: Національний університет «Львівська політехніка». 2015. – С. 46 – 47.

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень, символів, одиниць вимірювання, скорочень	17
Вступ.....	18
РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	24
1.1. Застосування алмазного вигладжування для обробки конструктивних концентраторів напружень деталей ГТД літальних апаратів.....	24
1.2. Аналіз проблем, які заважають розповсюдженню адитивних технологій та порошкових матеріалів в авіації та машинобудуванні, та можливі шляхи їх вирішення.....	38
1.3. Мета і задачі дослідження. Структурно-логічна схема дисертаційної роботи.....	47
1.4. Висновки.....	50
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	51
2.1. Аналіз досліджуваних матеріалів.....	51
2.2. Зразки для експериментальних досліджень.....	53
2.3. Устаткування для алмазного вигладжування.....	58
2.3.1. Інструмент для зміцнення.....	58
2.3.2. Розробка оправки для зміцнення конструктивного концентратора напружень типу «Поверхня поєднання двох діаметрів».....	60
2.3.3. Розробка пристрою для зміцнення конструктивного концентратора напружень типу «Поверхня переходу отвору у площину».....	62
2.3.4. Розробка оправки для зміцнення плоских поверхонь на обробляючих центрах з ЧПК.....	64
2.4. Методики дослідження якості поверхні і поверхневого шару.....	65
2.4.1. Методика дослідження шорсткості.....	65

2.4.2. Методика визначення величини мікротвердості та ступені деформаційного зміцнення.....	65
2.4.3. Методика дослідження розподілу залишкових напружень.....	66
2.5. Методика дослідження параметрів пористості.....	70
2.6. Методика дослідження на опір втомі.....	70
2.7. Методика дослідження напружено-деформованого стану.....	72
2.8. Методика статистичної обробки.....	73
2.9. Висновки.....	74
РОЗДІЛ 3 ЗМІЦНЕННЯ АЛМАЗНИМ ВИГЛАДЖУВАННЯМ ДЕТАЛЕЙ, ВИГОТОВЛЕНИХ ІЗ СПЛАВУ ЕП609-Ш.....	76
3.1. Вплив режимних параметрів алмазного вигладжування на характеристики поверхневого шару деталей зі сплаву ЕП609-Ш.....	76
3.1.1. Формування алмазним вигладжуванням якості поверхневого шару деталі.....	76
3.1.2. Дослідження впливу режимних параметрів алмазного вигладжування на величину ступені деформаційного зміцнення	82
3.1.3. Дослідження впливу режимних параметрів алмазного вигладжування на розподіл залишкових напружень.....	85
3.2. Алмазне вигладжування конструктивного концентратора напружень типу «Поверхня поєднання двох діаметрів».....	88
3.3. Алмазне вигладжування конструктивного концентратора напружень типу «Поверхня переходу отвору у площину».....	93
3.4. Висновки.....	98
РОЗДІЛ 4 ЗМІЦНЕННЯ АЛМАЗНИМ ВИГЛАДЖУВАННЯМ ДЕТАЛЕЙ, ОТРИМАНИХ СЕЛЕКТИВНИМ ЛАЗЕРНИМ СПІКАННЯМ.....	100
4.1. Алмазне вигладжування деталей зі сплаву на основі алюмінідів титану ОХ45-3ОДС.....	100
4.1.1. Ефективність зміцнення алмазним вигладжуванням сплаву на основі алюмінідів титану ОХ45-3ОДС.....	100

4.1.2. Формування якості поверхневого шару деталі зі сплаву на основі алюмінідів титану OX45-3ODS.....	104
4.1.3. Дослідження впливу алмазного вигладжування на формування ступені деформаційного зміцнення сплаву на основі алюмінідів титану OX45-3ODS.....	114
4.1.4. Зменшення алмазним вигладжуванням пористості деталі зі сплаву на основі алюмінідів титану OX45-3ODS.....	120
4.2. Формування алмазним вигладжуванням поверхневого шару деталей з сплаву INCONEL 718.....	127
4.3. Висновки.....	139
5 РОЗДІЛ ПРОГНОЗОВАНІ ЕФЕКТИ ЗМІЦНЕННЯ АЛМАЗНИМ ВИГЛАДЖУВАННЯМ ДЕТАЛЕЙ, ОТРИМАНИХ ЗА ДОПОМОГОЮ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПІКАННЯ.....	141
5.1. Дослідження впливу алмазного вигладжування на статичний запас міцності деталей ГТД літальних апаратів, отриманих селективним лазерним спіканням.....	141
5.2. Аналіз економічної ефективності застосування селективного лазерного спікання та алмазного вигладжування при виробництві деталей ГТД літальних апаратів.....	147
5.3. Висновки.....	151
Загальні висновки.....	153
Список використаних джерел.....	156
ДОДАТКИ.....	170
Додаток А Акт впровадження результатів дисертаційного дослідження	171
Додаток Б Акт впровадження результатів дисертаційного дослідження	172
Додаток В Профілограми поверхонь зразків зі сплаву на основі алюмініду титану OX75-3ODS.....	173
Додаток Г Мікрофотографії шліфів зразків зі сплаву на основі алюмініду титану OX75-3ODS після алмазного вигладжування з різним поєднанням режимних параметрів.....	178

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ
ВИМІРЮВАННЯ, СКОРОЧЕНЬ**

АВ – алмазне вигладжування

ГТД – газотурбінний двигун

ДФЕ – дробовий факторний експеримент

ЗОТС – змащувальне-охолоджувальне технологічне середовище

ККН – конструктивний концентратор напруження

ЛА – літальний апарат

НДС – напружено-деформований стан

КЕ – кінцевий елемент

СЛС – селективне лазерне спікання

ПК – персональний комп'ютер

ППД – поверхнева пластична деформація

ПФЕ – повний факторний експеримент

ЧПК – числове програмне керування

ВСТУП

Важливим питанням підвищення якості літальних апаратів одноразового та багаторазового використання є розробка, вдосконалення та впровадження принципово нових технологій, які б забезпечували їх високі технологічні і експлуатаційні властивості, призводили до зниження їх маси і вартості. В літальних апаратах широкого розповсюдження набуло використання газотурбінних двигунів (ГТД), які працюють в умовах високих навантажень та агресивного середовища. Це спричиняє появу тріщин, які призводять до руйнування двигунів. Серед причин руйнування найбільший відсоток мають корозія та втома. Для підвищення якості ГТД все більшого розповсюдження набуває використання жароміцних нікелевих і титанових сплавів. Вони характеризуються високим рівнем властивостей: міцність, опір окисленню та корозії. Але одночасно з цим зазначені сплави погано піддаються обробці різанням, що призводить до збільшення часу та вартості обробки. Також слід зазначити, що більша частина деталей двигуна має складний профіль і отримання заготовок для них традиційними методами призводить до необхідності знімання великої кількості стружки та низьких значень коефіцієнту використання матеріалу. Забезпечити виконання таких суперечливих вимог можливо, якщо застосувати до їх виробництва адитивні технології та методи порошкової металургії. Їх перевагами є можливість створення принципово нових матеріалів із заданими властивостями, які неможливо отримати іншими способами, отримання заготовок за формою, близькою до готової деталі, що істотно знизить витрати на подальшу обробку та впровадження у виробництво нових ГТД літальних апаратів.

Однак окрім великої кількості переваг є фактори, які стримують розповсюдження адитивних технологій для деталей авіаційної та ракетно-космічної техніки. До них відноситься залишкова пористість, низька точність та рівномірність отримуваних виробів, чутливість до концентрації напружень. Вони призводять до зниження запасу міцності та рівня надійності деталей ГТД.

Вирішити вказані завдання можна за допомогою локального поверхнево-пластичного деформування (ППД) алмазним вигладжуванням (АВ) поверхонь їх конструктивних концентраторів напружень. Особливості процесів пластичної деформації, що протікають в поверхневому шарі при АВ, дозволяють ефективно застосовувати його для зниження залишкової пористості і підвищення механічних характеристик місць концентрації напружень в деталях ГТД. Наприклад, виготовлених методом селективного лазерного спікання з алюмініду титану ОХ45–3ОДС та нікелевого сплаву INCONEL 718.

Отже, на сьогодні питання розширення сфери застосування адитивних технологій та підвищення якості поверхневого шару деталей, виготовлених з нікелевих сплавів та сплавів на основі алюмініду титану, отриманих за допомогою селективного лазерного спікання, є актуальним науково-прикладним завданням.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційну роботу виконано відповідно до наукового напрямку кафедри «Технології машинобудування» Національного університету «Запорізька політехніка» у рамках НДР №3115-1822/05-Д «Підвищення несучої здатності тонкостінних валів двигуна Д436Т1 технологічними методами» між університетом та АТ «МОТОР СІЧ» (УГК), стратегії відродження вітчизняного авіабудування на період до 2030 року, схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 8 липня 2020 року № 851-р.

Мета роботи і задачі дослідження. *Мета дослідження* – підвищення якості поверхневого шару конструктивних концентраторів напружень деталей ГТД літальних апаратів.

Для досягнення зазначеної мети поставлені наступні завдання дослідження:

- Виконати класифікацію конструктивних концентраторів напружень деталей ГТД літальних апаратів та визначити раціональну технологію підвищення їх якості.
- Виконати аналіз факторів, які заважають розповсюдженню адитивних технологій у виробництві, та особливостей застосування алмазного вигладжування для підвищення якості деталей ГТД літальних апаратів.

- Розробити спеціальні методики і пристрої для проведення алмазного вигладжування поверхонь та визначити раціональну геометрію алмазного вигладжувача для зміцнення конструктивних концентраторів напружень деталей ГТД літальних апаратів.
- Адаптувати методику визначення залишкових напружень методом зондувального отвору для застосування на поверхнях деталей ГТД літальних апаратів.
- Експериментально дослідити процес алмазного вигладжування з метою визначення впливу його технологічних умов та режимних параметрів зміцнення на параметри якості деталей ГТД літальних апаратів.
- Встановити основні закономірності формування параметрів якості, властивостей обробленої поверхні і поверхневого шару (шорсткість, величину деформаційного зміцнення, залишкових напружень) в залежності від режимних параметрів процесу (зусилля вигладжування, подача), геометрії алмазного вигладжувача (радіус вигладжувача), особливостей поверхневого шару (залишкова пористість) для деталей, отриманих за допомогою СЛС з різних матеріалів.
- Дослідити технологічні особливості обробки і впливу режимних параметрів алмазного вигладжування на параметри пористості при зміцненні деталей ГТД літальних апаратів, отриманих СЛС.
- Розробити технологічні рекомендації щодо застосування алмазного вигладжування для зміцнення конструктивних концентраторів напружень при виробництві деталей ГТД літальних апаратів.

Об'єкт дослідження – процес алмазного вигладжування поверхневого шару деталей ГТД літальних апаратів.

Предмет дослідження – закономірності зміни якісних параметрів поверхневого шару конструктивних концентраторів напружень деталей ГТД зі сплавів типу ЭП609-Ш, ОХ45–3ОДС та INCONEL 718 після алмазного вигладжування.

Методи дослідження. При виконанні дисертаційної роботи використані наступні методи аналізу: методи інженерної механіки – для дослідження

властивостей поверхневого шару та визначення залишкових напружень після обробки; металографічні методи – для дослідження параметрів пористості поверхневого шару; методи математичної статистики – для обробки результатів випробувань в програмному забезпеченні StatSoft (Statistica); чисельні методи – для розрахунку на статичну міцність деталей та визначення ефективності застосування зміцнення поверхні конструктивних концентраторів напружень.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. **Вперше**, запропоновано та експериментально доведено ефективність нового підходу до зміцнення конструктивних концентраторів напружень деталей, отриманих з порошкових матеріалів шляхом селективного лазерного спікання, що дозволило підвищити їх якість. Новий підхід базується на ефектах алмазного вигладжування: ущільненні поверхневого шару, його зміцненні та формуванні стискаючих залишкових напружень.

2. **Вперше**, встановлено та експериментально підтверджено закономірності зміни впливу режимних параметрів зміцнення на залишкову пористість, експериментально підтверджено закономірності зміни параметрів порового простору поверхневого шару деталей, отриманих методом селективного лазерного спікання зі сплавів OX45–3ODS та INCONEL 718, у взаємозв'язку з режимними параметрами локальної деформаційної обробки алмазним вигладжуванням, що дозволило визначити раціональні режими обробки з точки зору зменшення залишкової пористості поверхневого шару та напружено–деформованого стану.

3. **Отримали подальший розвиток** уявлення про вплив режимних параметрів алмазного вигладжування конструктивних концентраторів напружень деталей із сплаву ЕП609–Ш на опір втоми, що дозволило встановити їх раціональні поєднання, з точки зору забезпечення запасу міцності деталей ГТД.

Практичне значення отриманих результатів:

1. Розроблено технологічні рекомендації щодо використання алмазного вигладжування (раціональні режими обробки, геометричні параметри інструментів та особливості їх використання) для забезпечення високої якості поверхневого

шару поверхонь деталей, виготовлених із сплаву ЭП609–Ш; матеріалів, отриманих за допомогою СЛС із нікелевого сплаву INCONEL 718 та сплаву на основі алюмініду титану OX45–3ODS.

2. Розроблено оригінальний пристрій, що дозволяє виконувати алмазне вигладжування поверхонь конструктивного концентратора напружень типу «поверхня поєднання двох діаметрів», який забезпечує постійну силу вигладжування під час обробки в усіх точках поверхні (патент №36340 Україна).

3. Розроблено оригінальний пристрій, що дозволяє виконувати алмазне вигладжування поверхні переходу отвору у площину (патент №63243 Україна).

4. Розроблено оригінальний пристрій, що дозволяє виконувати алмазне вигладжування площинних поверхонь на верстатах з числовим програмним керуванням.

5. Удосконалено методику визначення залишкових напружень на поверхнях деталей ГТД літальних апаратів методом зондувального отвору.

6. Результати дисертаційної роботи були використані при обробці деталей ГТД літальних апаратів (ДП «Івченко–Прогрес», АТ «МОТОР СІЧ»).

7. Результати дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі кафедри технології машинобудування національного університету «Запорізька політехніка» при підготовці бакалаврів і магістрів за спеціальністю 131 «Прикладна механіка», освітньої програми «Технології машинобудування».

Особистий внесок здобувача. Основні наукові положення і результати, які виносяться на захист дисертаційної роботи, отримано здобувачем самостійно. Серед них: розробка різноманітних методик; проведення експериментальних досліджень; обробка отриманих результатів і їх аналіз; розробка технологічних рекомендацій. Спільно із співробітниками лабораторії «Новітні технології авіадвигунобудування» національного університету «Запорізька політехніка» проведено дослідження залишкових напружень поверхневого шару методом зондувального отвору та визначення величини деформаційного зміцнення. При цьому автором виконано розрахунки і обробку результатів експериментів.

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи докладались і обговорювались на науково–практичних та науково–технічних конференціях: «Молодь в авіації: нові рішення і передові технології» (Алушта, 2007, 2008 рр.); «XII Міжнародний конгрес двигунобудівників» (Рибаче, 2007 р.); «Проблеми енергозбереження і механізації в гірничо–металургійному комплексі» (Кривий Ріг, 2011 р.); «Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво» (Запоріжжя – 2009 р., Суми – 2010 р., Київ – 2012 р., Кременчук – 2013 р., Суми – 2014 р.); XXII міжнародний науково–технічний семінар «Високі технології: Тенденції розвитку» (Одеса, 2014 р.); III Всеукраїнська науково–технічна конференція «Прогресивні технології в машинобудуванні» (Львів, 2015 р.); XI Міжнародні науково–технічні читання ім. А.Ф. Можайського (Запоріжжя, 2018 р.); «XVX Міжнародний конгрес двигунобудівників» (Харків, 2020 р.); IEEE 10th International Conference Nanomaterials: Applications & Properties (NAP) (Суми 2020 р.).

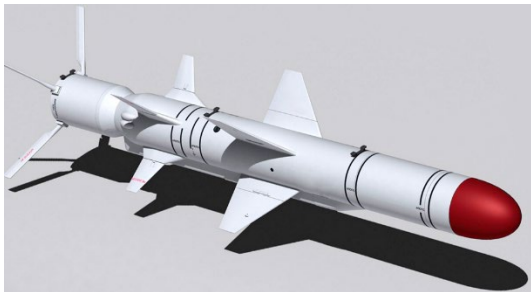
Публікації. Основний зміст дисертації відображено у 20 наукових публікаціях, серед яких – 6 статей у наукових фахових виданнях України, 2 – у виданнях, включених до міжнародних наукометричних баз SCOPUS та Web of Science, 2 патенти України на корисні моделі, 10 – матеріалах конференцій.

Структура й обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з анотації двома мовами, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел з 118 найменувань та 4 додатків. Дисертацію викладено на 180 сторінках комп'ютерного тексту (основна частина – 156 сторінок), містить 38 таблиць та 75 рисунків.

РОЗДІЛ 1
АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ.
ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1. Застосування алмазного вигладжування для обробки конструктивних концентраторів напружень деталей ГТД літальних апаратів

У сучасному світі з кожним роком збільшується відсоток використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА), які починають використовуватися у всіх сферах людського життя, від оборонної галузі до доставки пошти. Вони поділяються на апарати одноразового та багаторазового використання (рис. 1.1.).



а



б



в

Рис. 1.1. Сучасні перспективні БПЛА вітчизняного виробництва:
а – одноразового використання; б, в – багаторазового використання.

В них широкого розповсюдження набуває використання газотурбінних двигунів. Зразки подібних ГТД вже мають як вітчизняні так і закордонні провідні виробники авіаційної техніки (рис. 1.2.).



Рис. 1.2. Перспективні ГТД

В умовах високої конкурентної боротьби та постійного підвищення вимог до ГТД літальних апаратів, для провідних вітчизняних і закордонних виробників авіаційної техніки, є актуальним завдання пошуку можливостей щодо покращення їх якості та технічних характеристик, одночасно із зниженням їх собівартості. Також слід зазначити, що двигуни працюють у агресивному середовищі при високих температурах, негативний вплив зазначених чинників призводить до зниження їх характеристик та руйнування [1].

Це обумовлює необхідність розробки стратегії постійного підвищення якості та експлуатаційних характеристик деталей ГТД літальних апаратів. Вищезазначене досягається розробкою і впровадженням нових технологій обробки деталей та отримання заготовок.

Реалізація даної стратегії відбувається на основі визначення факторів, які мають безпосередній вплив на формування якості та експлуатаційних характеристик деталі. До них відносяться матеріал, форма конструктивних концентраторів напружень (ККН), технологічний процес виготовлення, параметри поверхневого шару. Взаємозв'язок між ними визначаються за допомогою побудови фігурної матриці, в рамках якої фіксуються параметри, які мають вплив на якість деталі (рис. 1.3.). Центральною частиною матриці є таблиця, в якій стовбці характеризують параметри, що впливають на якість, а строки визначають параметр, який необхідно забезпечити. У верхній частині матриці показано взаємозв'язок між параметрами.

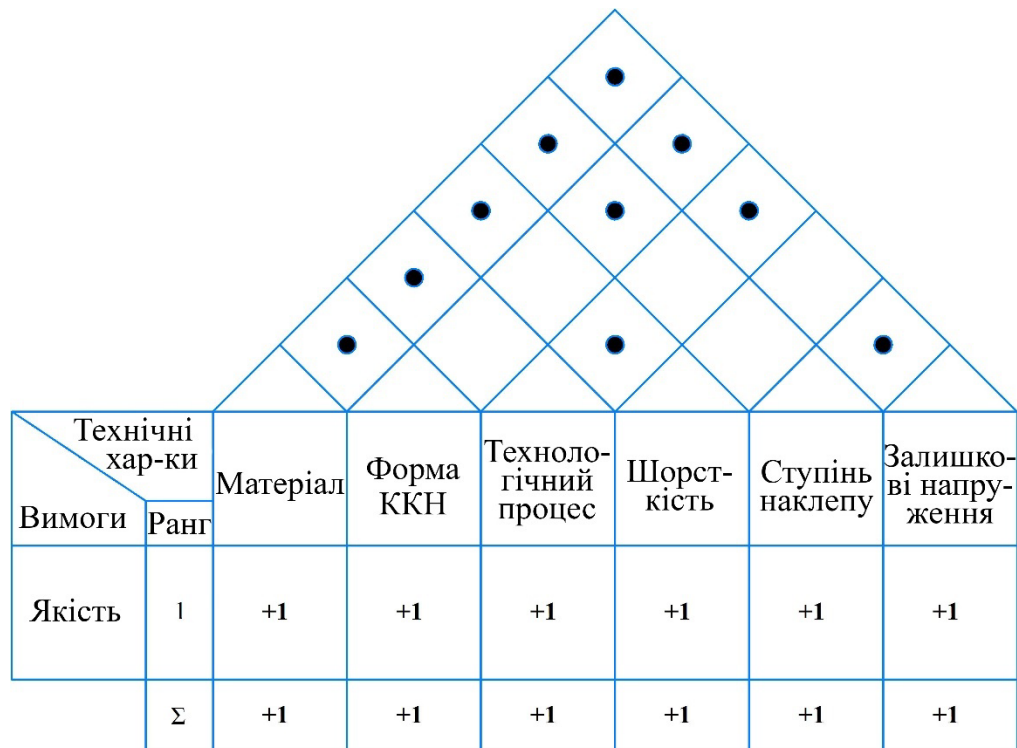


Рис. 1.3. Матриця взаємозв'язку між якістю та параметрами які мають на неї вплив

Одним з факторів покращення якості та технічних характеристик деталей ГТД літальних апаратів є використання нових матеріалів з високими фізико-технічними характеристиками. Застосування таких матеріалів в типовому ГТД показано на рис. 1.4. Вони здатні зберігати свої фізичні та механічні властивості впродовж тривалого часу при дії на них великих температур та навантажень у агресивному середовищі [2],[3].

Однак обробка даних матеріалів супроводжується певними особливостями. Внаслідок малої теплопровідності та великої здатності до зміцнення обробка вимагає більшого часу та використання дорогого інструменту та спеціальних охолоджуючих технологічних середовищ [4], [5], [6], [7], [8], [9].

Моноколеса	Вали	Диски
BT 25Y	ЭП 609	ЭП 718
BT 8Y	ЭИ 961	INCONEL 718
OX45-30DS (SLS)ЭП 609 (SLS)INCONEL 718 (SLS)		

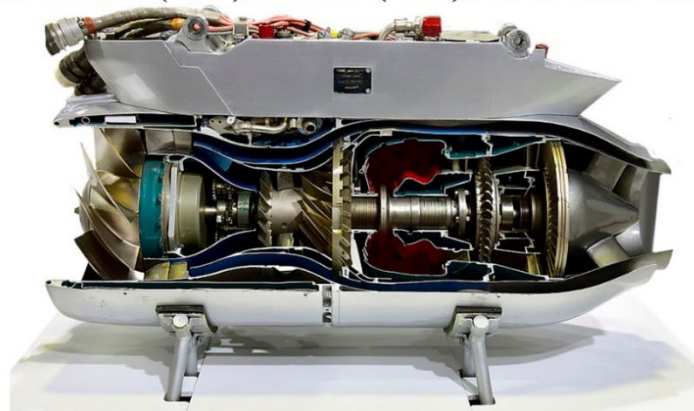


Рис. 1.4. Застосування матеріалів з високими фізико-технічними характеристиками у типовому ГТД літального апарату

Також впливовим фактором, що визначає якість та експлуатаційні характеристики деталі є стан поверхневого шару. Вплив параметрів поверхневого шару на опір втомі показано на рис. 1.5. Найбільший вплив з параметрів, які характеризують якість поверхневого шару та поверхні деталі, мають шорсткість та степінь деформаційного зміцнення.

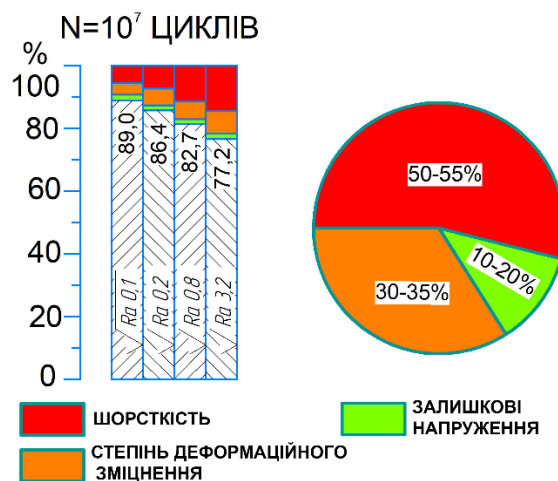


Рис. 1.5. Вплив параметрів поверхневого шару на опір втомі

Особливості виготовлення деталей ГТД визначаються технічними вимогами, які розробляються при розробці виробів. Типові технічні умови щодо якості типових деталей ГТД літальних апаратів показані на рис. 1.6.

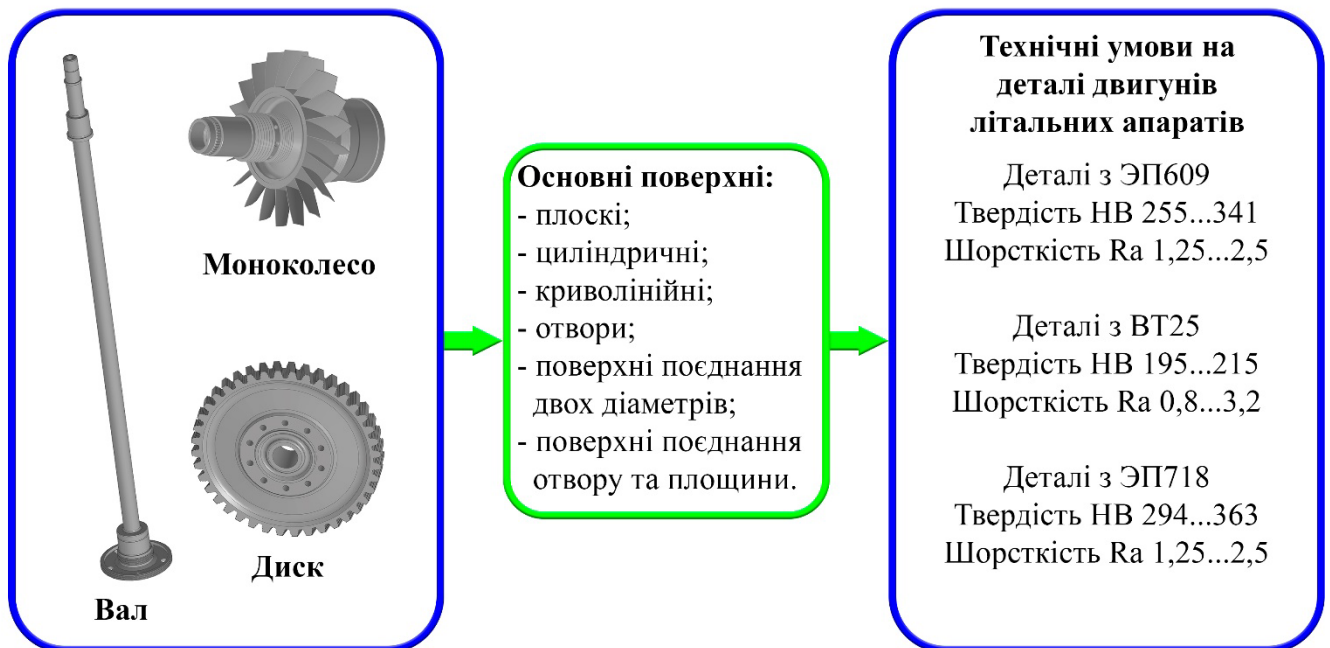


Рис. 1.6 – Технічні умови щодо якості деталей ГТД літальних апаратів

Конструктивними особливостями деталей ГТД літальних апаратів є те, що більшість з них є тонкостінними, мають складну форму та до них пред'являються високі вимоги щодо геометричної точності.

Питанням впливу деформаційного зміцнення поверхневого шару конструктивних концентраторів напружень на якість деталей та визначення особливостей їх обробки майже не досліджено. Більшість досліджень з питань підвищення якості деталей виконані на прикладі звичайних циліндричних або плоских поверхнях та не враховують вплив конструктивних концентраторів напружень.

Великий вплив на якість та експлуатаційні характеристики деталей мають їх конструктивні особливості. Товщина стінки у різних перерізах деталей ГТД

може змінюватися у великих межах, що ускладнює її обробку та прогнозування якості та експлуатаційних характеристик деталі в цілому. Велика кількість фланцевих та радіальних отворів значно знижують характеристики міцності деталі. Деякі деталі, що входять до конструкції ГТД, проходять крізь весь двигун і під час роботи відчують дію не рівномірних температурних навантажень, що одночасно з недостатньою якістю поверхневого шару конструктивних концентраторів напружень, можуть викликати появу температурної корозії та тріщин втомі, і як наслідок призводити до руйнування деталі. Більшість деталей ГТД мають складну геометричну форму, а недосконалість технологічних процесів їх виготовлення можуть призводити до появи технологічних концентраторів напружень, що також негативно впливає на якість та експлуатаційні характеристики деталі.

Під час роботи двигуна конструктивні концентратори напружень визивають значне збільшення напружень в місцях їх розташування (рис. 1.7.) та підвищують можливість виникнення тріщин втомі (рис. 1.8.). Великий вплив на ймовірність їх появи мають геометричні параметри конструктивного концентратора напружень та якість його поверхневого шару, яка визначається технологічним процесом обробки деталі та формуються на фінішних операціях [12].

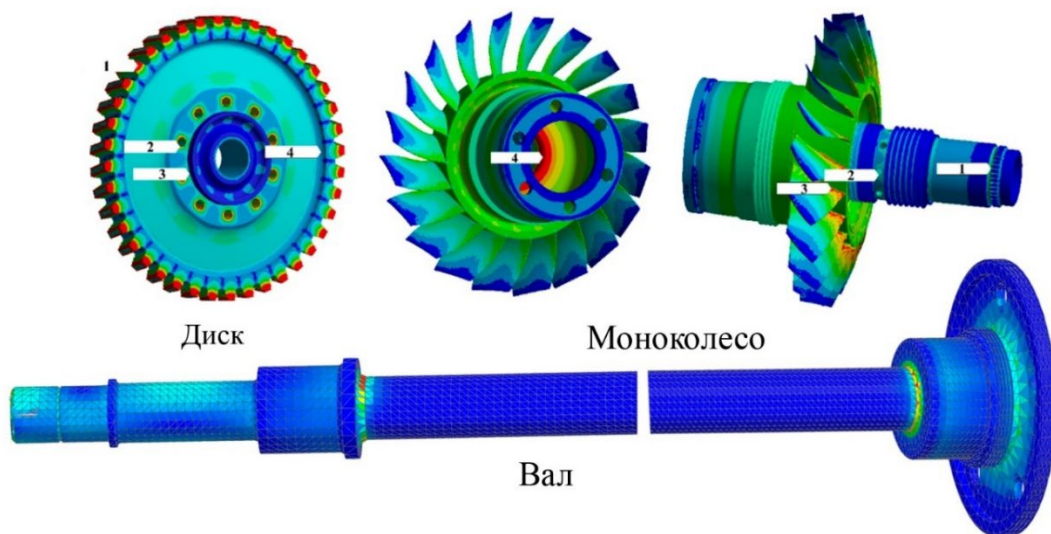


Рис. 1.7. Аналіз напружено-деформованого стану (НДС) типових деталей ГТД літального апарату

Виникнення тріщин втомі від недостатньої якості поверхневого шару конструктивних концентраторів напружень показано на рис. 1.8.



Рис. 1.8. Приклади руйнування деталей внаслідок появи тріщин втомі [10,11]

Величина напружень, яку визивають конструктивні концентратори, визначається теоретичним коефіцієнтом концентрації напружень [13]. В табл. 1.1 показано величини теоретичного коефіцієнта концентрації напружень на прикладі типового валу ГТД літального апарату.

Таблиця 1.1

Теоретичні коефіцієнти концентрації напружень валу

Вид конструктивного концентратора напружень	Розміри, мм	Теоретичний коефіцієнт концентрації напружень
Радіальний отвір	5	3
Отвір на фланці валу	2	2,5
Отвір на фланці валу	20	2
Поверхня поєднання двох діаметрів	10	1.7
Зуб'я	2,35	1,6
Різь	1,5	1,4

Як можна бачити з даних табл. 1.1 найбільшої величини концентрація напружень набуває у радіальних отворах, отворах на фланцях та у поверхні поєднання двох діаметрів.

Технічними вимогами в базовому технологічному процесі виготовлення валу формування поверхні переходу на радіальному отворі визначено наступне «виконати фаску або радіус розміром 1,1...1,5мм». За заводською технологією ця поверхня формується за допомогою ручного полірування шарошкою (рис. 1.9). При цьому на її якість, форми та геометрію значний вплив буде мати кваліфікація робітника [14], [15].



Рис. 1.9. Кінематична схема формування поверхні переходу отвору та площини за базовим технологічним процесом

Зазначені особливості призводять до того, що у деталях однієї партії будуть формуватися різні за формою та розмірами поверхні переходу, що в свою чергу приведе до різної концентрації напружень.

На рис. 1.10 показані напруження, які виникають на поверхні переходу отвору у площину в межах вимог визначених базовим технологічним процесом.

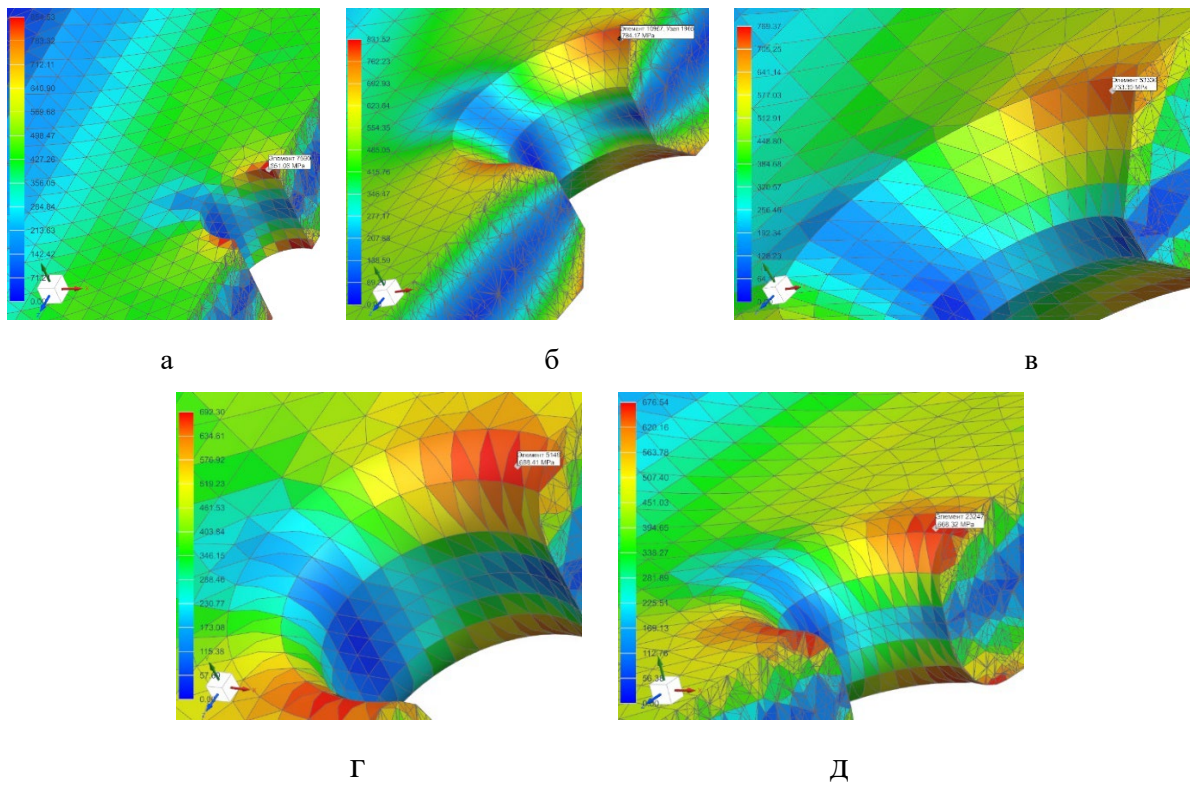


Рис. 1.10. Концентрація напружень при різній геометрії поверхні переходу отвору у площину: а – гостра кромка $\sigma_{\max}=851$ МПа; б – фаска 1,1 мм $\sigma_{\max}=784$ МПа; в – фаска 1,6 мм $\sigma_{\max}=733$ МПа; г – радіус закруглення 1,1 мм $\sigma_{\max}=688$ МПа; д – радіус закруглення 1,6 мм $\sigma_{\max}=668$ МПа;

Формування поверхні переходу дозволяє зменшити концентрацію напружень у порівнянні з гострою кромкою та змістити їх максимум від поверхні вглибину вздовж осі отвору [16], [17]. Як можна бачити (рис. 1.10) найменшу концентрацію напружень буде визивати поверхня переходу у формі радіусу закруглення розміром 1.6 мм.

Окрім отворів, деталі ГТД літальних апаратів мають велику кількість ступінчатих поверхонь, в місцях сполучення яких буде виникати велика концентрація напружень. Для її зниження між двома ступінчатими поверхнями формують поверхню переходу двох діаметрів, у формі радіусу певного розміру. Посилює негативний вплив даного концентратора напружень на надійність деталі технологічні особливості його виготовлення. Так, наприклад, поверхні переходу

для плоских поверхонь формуються фрезерною обробкою, яка може призвести до появи на них «рисок», технологічних концентраторів напружень, котрі в свою чергу будуть визивати додаткову концентрацію та призводити до можливого виникнення втомних тріщин.

Зменшення чутливості до концентрації напружень можна досягти, якщо використати для обробки концентраторів один з методів поверхнево-пластичного деформування (рис. 1.11.).

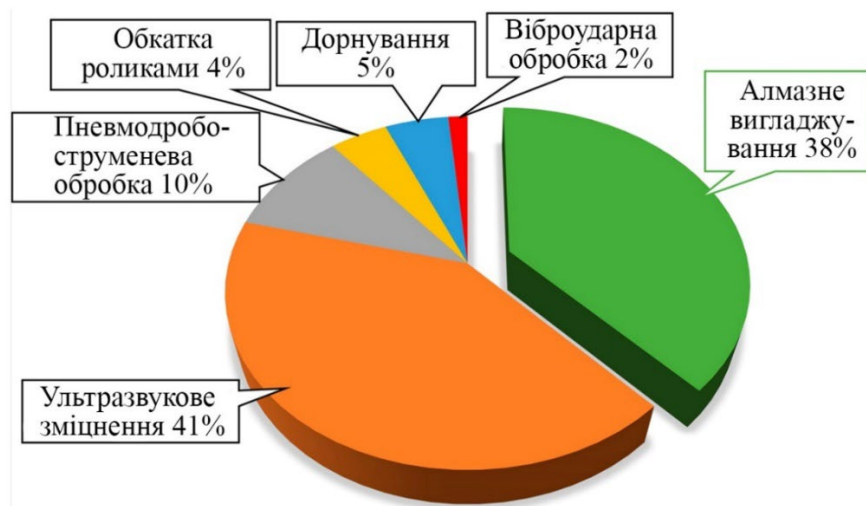


Рис. 1.11. Поширені методи ППД

Серед них для зміцнення досліджуваних концентраторів напружень найбільшого розповсюдження набули методи поверхнево-пластичного деформування [18], [19], методи динамічного впливу на поверхні зміцнення [20], [21], електрофізичні методи зміцнення. Застосування більшості з цих методів для обробки деталей ГТД літальних апаратів є неможливим оскільки супроводжується наведенням на поверхню, яка оброблюється, великого контактного тиску, значними енерговитратами процесу, що в свою чергу може призвести до зниження якості поверхонь після обробки. Особливістю всіх цих методів (рис. 1.12), окрім алмазного вигладжування, є те, що впливу піддається вся поверхня отвору у осьовому напрямку, в той час як найбільшого значення концентрація напружень набуває біля гострої кромки отвору [22]. Також зазначені методи зміцнення неможливо застосувати для тонкостінних деталей та для обробки конструктивних

концентраторів напружень невеликих розмірів (рис. 1.13). Вони вимагають значних фінансових витрат на впровадження.

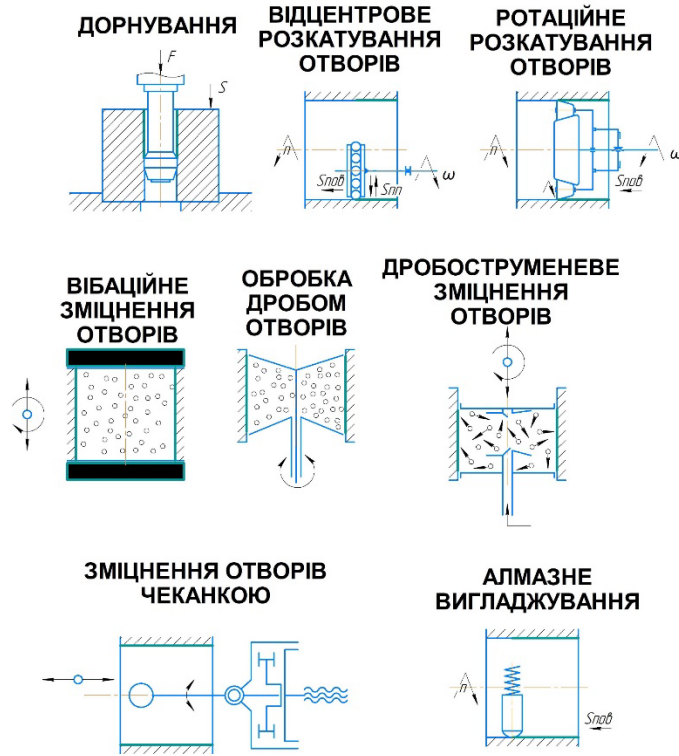


Рис. 1.12. Обробка отворів методами поверхнево-пластичного деформування

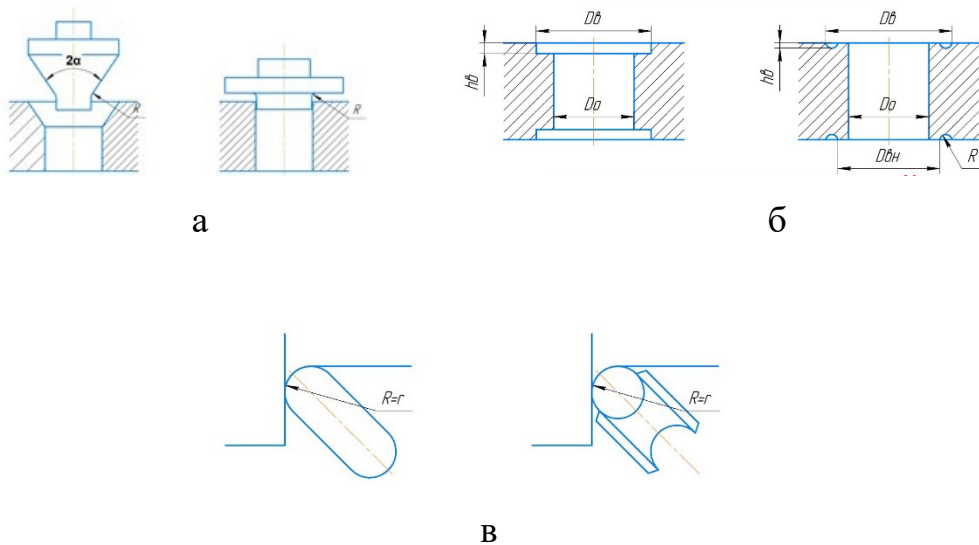


Рис. 1.13 – Обробка поверхонь переходу методами поверхнево-пластичного деформування: а – обробка динамічною чеканкою; б – обробка обтисканням; в – обробка роликками

Тому раціональним методом для підвищення якості поверхонь конструктивних концентраторів напружень деталей ГТД літальних апаратів буде локальне пластичне деформування алмазним вигладжуванням [23].

Алмазне вигладжування призводить до значного покращення міцності та якості деталі, дозволяє навести у її поверхневому шарі стискаючі напруження [24]. Його сутність полягає в пластичному деформуванні поверхневого шару оброблюваної поверхні алмазним вигладжувачем. Особливістю методу є невелика площа контакту між інструментом-вигладжувачем та поверхнею обробки, внаслідок чого на поверхні обробки наводиться великий питомий контактний тиск та виконується зміцнення поверхневого шару. Кінематичні схеми алмазного вигладжування досліджуваних конструктивних концентраторів напружень показано на рис. 1.14.

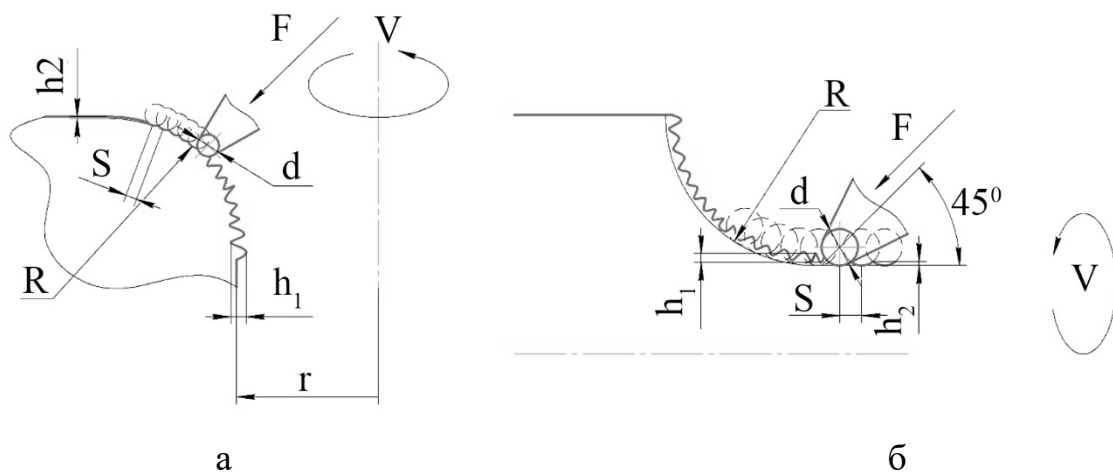


Рис. 1.14. Кінематична схема зміцнення конструктивних концентраторів напружень алмазним вигладжуванням: а – обробка поверхні переходу отвору у площину; б – обробка поверхні типу «Поверхня поєднання двох діаметрів»

Так на рис. 1.14 R – радіус поверхні обробки; d – діаметр алмазного вигладжувача; h_1 – висота нерівностей до обробки; h_2 – висота нерівностей після обробки; S – подача; F – зусилля вигладжування; V – швидкість вигладжування.

Головною умовою застосування вигладжування є необхідність забезпечити постійне притиснення вигладжувача як по нормалі, так і в дотичному напрямку відносно точки контакту з поверхнею обробки. На ефективність застосування алмазного вигладжування буде мати вплив: оброблюваний матеріал; пружні відтиснення під час обробки; траєкторія переміщення вигладжувача відносно поверхні обробки; форма та розмір вигладжувача; глибина занурення інструменту у поверхню обробки. Також слід зазначити, що даний метод ППД відноситься до методів фінішної обробки, тому на його результативність значний вплив буде мати стан поверхні після попередньої обробки.

На якість поверхні деталі після алмазного вигладжування великий вплив має технологічна спадковість. Це відбувається через те, що переважна більшість пристроїв для алмазного вигладжування працюють за пружною схемою. При цьому притиснення вигладжувача до поверхні обробки виконується за допомогою пружини або спеціального пружного елемента. В результаті вигладжувач копіює похибки форми та взаємного розташування поверхонь, і великий вплив на результат алмазного вигладжування має точність поверхні, яка була отримана на попередніх операціях. Тому для раціонального застосування алмазного вигладжування шорсткість поверхні після попередньої обробки повинна бути якомога меншою [25]. Але це не виключає його ефективного застосування і після чорнових методів обробки, якщо це визначається умовами виконання технології обробки деталі.

Характерною рисою алмазного вигладжування є чутливість алмазу до температури в зоні обробки. При досягненні температури в зоні контакту 700 – 750 °С робоча ділянка алмазу починає руйнуватися, що призводить до різкого погіршення шорсткості поверхні та пришвидшеному зносу вигладжувача. На ньому з'являється площадка зносу, тому для введення в зону обробки нової ділянки вигладжувача для її усунення необхідно виконати поворот державки. Кількість таких поворотів залежить від форми та розмірів вигладжувача [26]. Зменшення температури в зоні обробки виконується за допомогою використання державок більшого розміру, для виготовлення яких необхідно використовувати матеріали з

високою теплопровідністю. Також для зменшення температури вигладжувача використовують спеціальні радіаторні державки [27], але внаслідок невеликих розмірів вигладжувачів це може призвести до послаблення їх жорсткості, що є нераціональним.

Для інтенсифікації процесу вигладжування оброблюваної поверхні та зменшення температури вигладжування широкого розповсюдження набуло використання спеціальних охолоджувальних технологічних середовищ [28].

Значний вплив на ефективність застосування алмазного вигладжування мають режимні параметри процесу зміцнення. За даними В. А. Хрулькова [29] радіус сфери алмазу та зусилля вигладжування необхідно обирати в залежності від оброблюваного матеріалу, для запобігання явища перенаклепу поверхневого шару. За даними Папшева Д. Д. [30] при вигладжуванні жароміцних матеріалів радіус сфери алмазного вигладжувача необхідно обирати менше ніж при обробці звичайних матеріалів. Критерієм вибору подачі вигладжування насамперед є шорсткість, яку необхідно досягти. Швидкість вигладжування частіше за все не має значного впливу на якість поверхні після обробки. Так, при обробці звичайної конструкційної сталі зміна швидкості у діапазоні від 10 – 100 м/хв не призводить до зміни у стані та якості поверхневого шару. Але необхідно зазначити, що швидкість має безпосередній вплив на температуру у зоні обробки та знос алмазного вигладжувача. Також вона має великий вплив на продуктивність процесу алмазного вигладжування. Тому критерії призначення швидкості різання необхідно формулювати в залежності від конкретного типу матеріалу та виду конструктивного концентратора напружень. Слід зазначити, що більшість досліджень, направлених на пошук раціонального поєднання режимних параметрів, враховують їх вплив тільки на один параметр якості. Але у деяких випадках на різні параметри якості вони можуть мати різний вплив.

Тому раціональне використання алмазного вигладжування для підвищення якості поверхонь конструктивних концентраторів напружень неможливе без врахування всіх характерних особливостей процесу обробки.

Головними перевагами алмазного вигладжування у порівнянні з іншими методами зміцнення є значно менші витрати на виготовлення оснащення для зміцнення конструктивних концентраторів напружень та можливість його застосування для обробки деталей ГТД літальних апаратів будь-якого розміру.

Алмазне вигладжування є актуальним методом зміцнення конструктивних концентраторів напружень деталей ГТД літальних апаратів, але його ефективне застосування можливо тільки при комплексному підході щодо вибору раціонального поєднання режимних параметрів процесу та геометрії алмазного вигладжувача. При виконанні зазначеної умови даний метод зміцнення дозволить досягти значного зменшення негативного впливу конструктивних концентраторів напружень на надійність деталі та підвищити якісні параметри її поверхневого шару.

1.2. Аналіз проблем, які заважають розповсюдженню адитивних технологій та порошкових матеріалів в авіації та машинобудуванні, та можливі шляхи їх вирішення

Як вже було зазначено вище постійне підвищення вимог до деталей ГТД літальних апаратів, вимагає все більшого використання сталей та сплавів, що мають більш високі механічні характеристики порівняно зі звичайними матеріалами [31]. Незважаючи на великі переваги застосування зазначених матеріалів їх головними недоліками залишаються висока вартість обробки при виготовленні деталей та недостатні технологічні властивості. Окрім цього слід відмітити, що більшість деталей авіаційної та ракетно-космічної галузі мають складну форму, що призводить до низьких значень коефіцієнту використання матеріалу при отриманні заготовок традиційними методами. Актуальним напрямком розв'язання вказаних проблем є застосування адитивних технологій для виготовлення деталей [32] та застосування у якості сировини порошкових

матеріалів. До них відносять спечені сплави, які отримують методами порошкової металургії [33] та сплави, отримані за допомогою адитивних технологій [34].

Основною перевагою застосування адитивних технологій є реалізація нездійснених раніше або складно досяжних технологічних завдань по виробництву деталей ГТД літальних апаратів [35]. Сучасними вченими на основі виконаних досліджень та їх аналізу сформульовані наступні переваги адитивних технологій у порівнянні з традиційними методами обробки [36], [37], [38]:

- зменшення кількості деталей у вузлах, виготовлення деталей зі складною геометрією внутрішніх порожнин;
- зменшення часу на виготовлення деталі;
- зменшення часу на впровадження нового виробу у виробництво;
- виготовлення деталей з малим припуском;
- відсутність необхідності у виготовленні оснащення для заготівельного виробництва;
- зменшення шкідливого впливу на навколишнє середовище;
- зменшення вимог до кваліфікації робочого;
- можливість отримання гармонічних матеріалів [39];
- отримання матеріалів з найменшою кількістю домішок, та точною відповідністю хімічного складу, порівняно з литими сплавами, за рахунок використання чистих порошоків [40];
- виконання топологічної оптимізації, що призводить до значного зменшення ваги виробу [41].

Всі ці переваги призводять до того, що з кожним роком відсоток використання адитивних технологій у виробництві деталей авіаційної та ракетно-космічної галузі постійно збільшується, але на сьогодні відсоток їх використання є низьким порівняно до інших галузей машинобудування (рис. 1.15.).

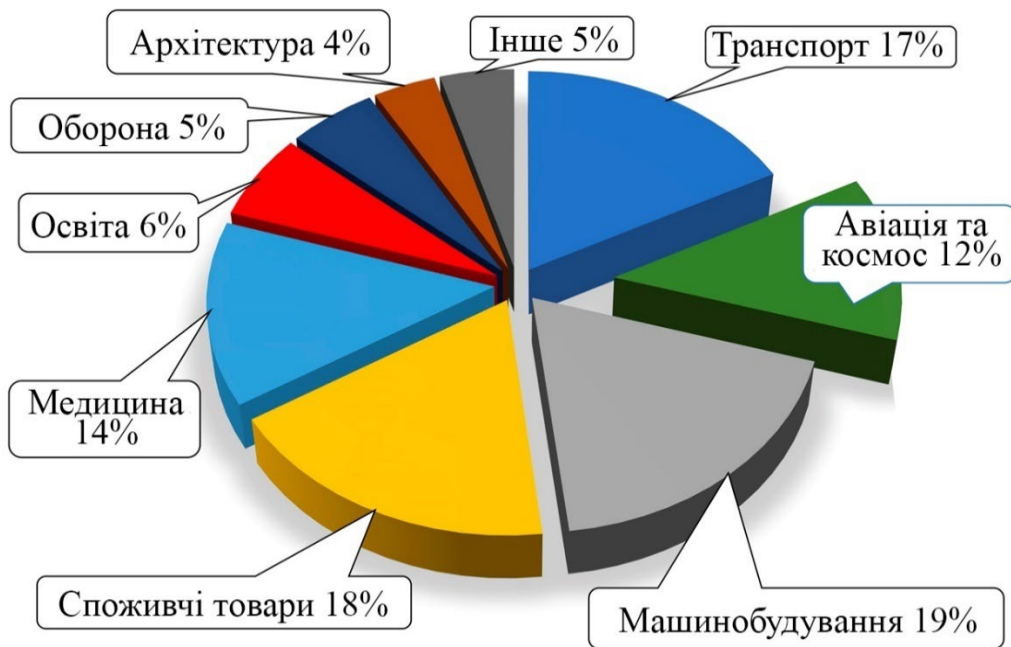


Рис. 1.15. Галузі застосування адитивних технологій

Слід відмітити, що у авіаційній та космічній галузі відсоток їх використання є дуже низьким близько 12%. Приклади застосування даних технологій для виробництва деталей ГТД літальних апаратів показано на рис. 1.16.



Рис. 1.16. Деталі машин, отримані шляхом синтезу з порошків [42], [43], [44], [45],

[46]

Серед адитивних технологій широкого розповсюдження для виробництва деталей ГТД літальних апаратів набула технологія селективного лазерного спікання (СЛС). Принципова схема процесу виготовлення деталі за даною технологією показана на рис. 1.17.

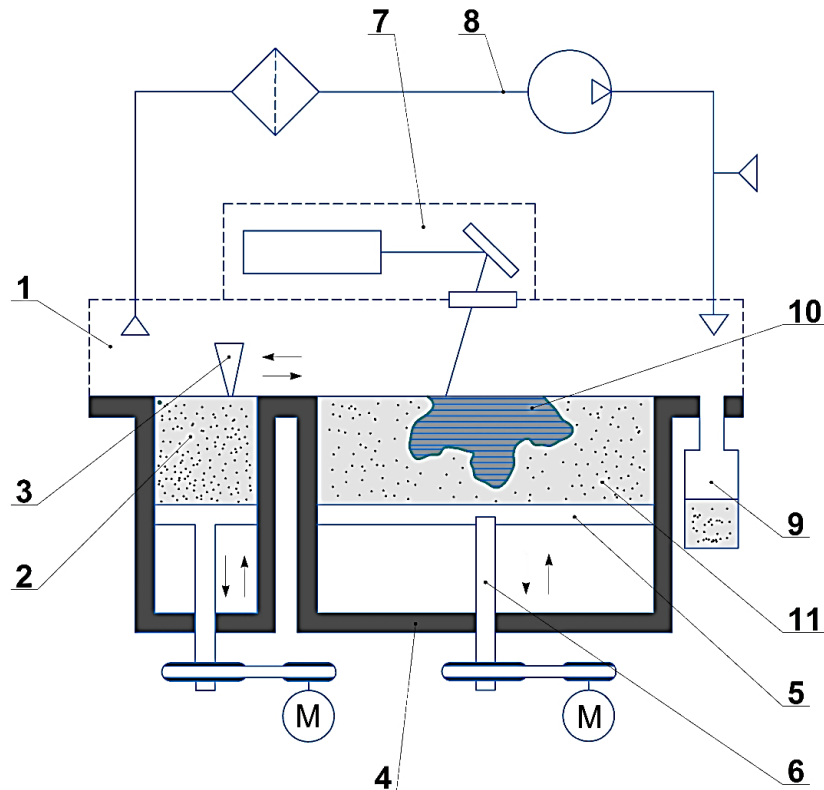


Рис. 1.17. Кінематична схема СЛС: 1 – робоча камера; 2 – пристрій дозування порошку; 3 – пристрій розрівнювання порошку; 4 – колодязь побудови; 5 – платформа побудови; 6 – механізм вертикального переміщення платформи побудови; 7 – лазерна оптична система; 8 – система формування захисної атмосфери; 9 – система накопичення надлишкового порошку; 10 – деталь; 11 – порошок

Процес СЛС відбувається у наступній послідовності. Спеціальне відділення 3D принтера 11 заповнюється металевим порошком, запускається друк. За допомогою лазерної оптичної системи 7 промінь лазера спрямовується на необхідні ділянки порошку, спікаючи їх шар за шаром. Після спікання першого шару

механізм 5 опускає платформу на товщину шару, за допомоги пристрою розрівнювання порошку, додається тонкий шар порошку поверх надрукованого перерізу, і процес відбувається заново до повної побудови об'єкта.

У порівнянні з іншими адитивними технологіями СЛС має ряд істотних переваг [47]:

- висока продуктивність, оскільки селективне лазерне спікання не вимагає повного розплавлення порошку;
- деталі отриманні за даною технологією мають високу міцність, точність, кращу якість поверхні порівняно з іншими методами адитивних технологій;
- 3D принтери, які використовуються при даному методі побудови, мають більшу робочу зону порівняно з іншими методами, що дозволяє виготовляти великогабаритні деталі або партії малогабаритних деталей;
- не вимагає при побудові використання допоміжного оснащення, в якості підтримуючих структур виступає сам порошок;
- процес друку майже не має відходів, порошок, який залишається, після просіювання можна повторно використовувати.

Але не зважаючи на великі переваги даний метод отримання деталей має ряд недоліків (рис. 1.18), які затримують його розповсюдження.



Рис. 1.18. Недоліки адитивних технологій

Без вирішення або зменшення їх негативного впливу неможливе раціональне застосування СЛС для виробництва деталей ГТД літальних апаратів.

Також перешкоджають широкому розповсюдженню СЛС високі початкові вкладення для впровадження даної технології у виробництво. Так, наприклад, вартість типової установки для селективного лазерного спікання з робочою зоною середніх розмірів складає приблизно 250 000\$ [48]. Але при цьому, виконуючи розрахунки початкових капітальних вкладень, дослідники частіше за все порівнюють вкладення необхідні на впровадження СЛС з наявним обладнанням, що не є вірним. Порівняльний розрахунок необхідно виконувати між капітальними вкладеннями необхідними на впровадження дільниці з установками СЛС та дільниці, яка складається з типових сучасних верстатів ЧПК. При цьому результат розрахунку при виробництві деталей ГТД літальних апаратів з порошкових матеріалів може бути на користь СЛС. Також слід зазначити, що вартість порошку є значно вище вартості за таку ж кількість матеріалу, отриманого одним з традиційних методів лиття або штампування. Але необхідно враховувати, як вже було зазначено вище, що указана технологія отримання деталей дозволяє значно скоротити необхідну кількість обладнання, витрати на обробку та матеріал. Слід відмітити, що також несприятливою характерною особливістю всіх адитивних технологій, які використовуються в авіаційній та ракетно-космічній галузі, є високі вимоги до якості порошків, що в свою чергу призводить до їх високої вартості. Тому, без детального аналізу порівняння традиційної технології виготовлення та виготовлення за допомогою СЛС на прикладі конкретної деталі, говорити про їх більш високу вартість не є раціональним.

Також слід зазначити, що на розповсюдження СЛС великий вплив мають якість порошку з якого відбувається друк. Широкого поширення серед порошкових матеріалів, які використовуються для виробництва деталей ГТД літальних апаратів, набули сплави на основі алюмінідів титану [49] та жароміцні нікелеві сплави родини INCONEL [50], [51], [52]. Ці матеріали мають високі якісні характеристики, які зберігаються при високих температурах, мають високу

жароміцність та опір повзучості [53], [54]. Але слід відмітити, що ці матеріали мають і недоліки, притаманні усім порошковим матеріалам.

Одним з чинників, який заважає широкому розповсюдженню деталей, синтезованих з порошкових сплавів, є їх залишкова пористість [55]. Однією з причин появи залишкової пористості в деталі, яка отримана СЛС, є не повне розплавлення порошку при формуванні перерізу при друці. В результаті формуються точкові з'єднання між частками порошку, що є передумовою появи пористості [56]. Залишкова пористість має негативний вплив на якість, міцність, пластичність, в'язкість руйнування, тріщиностійкість, оброблюваність різанням та триботехнічні характеристики. Також слід зазначити, що головним негативним фактором залишкової пористості є формування тупикових пор у поверхневому шарі деталі, які будуть посилювати напруження в конструктивних концентраторах або можуть бути, в залежності від розміру, самостійними концентраторами напружень.

Питанню зниження залишкової пористості присвячена велика кількість робіт вітчизняних та закордонних дослідників. Так, використання дисперсійного зміцнення оксидами ітрію дозволяє значно знизити залишкову пористість [57]. На етапі синтезу деталі за допомогою варіювання режимів друку можна керувати величиною пористості від серцевини зразка до його поверхні [58], [59], але це призводить до значного збільшення часу друку. Також ця методика значно ускладнює процес друку, оскільки вимагає пошуку законів впливу режимних параметрів селективного лазерного спікання на залишкову пористість. Використання дрібнодисперсних порошоків дозволяє значно понизити величину залишкової пористості [60]. При цьому, широкого розповсюдження для отримання порошоків малої фракції набуває газова атомізація. Даний метод дозволяє отримати порошок з фракцією 10 – 80мкм [61], [62]. Проте це у свою чергу, значно підвищує їх вартість.

Високу вартість порошку титанових сплавів можна знизити застосуванням дегідратії та отриманням, в результаті, неферичних порошоків сплавів титану, які, за деякими показниками, перевершують сферичні [63], [64]. Проте, це знизить

характеристики міцності матеріалу. Також для промислового застосування необхідно розв'язати проблему розподілу цього порошку в обмеженому об'ємі та вирішити питання, пов'язанні з особливостями переміщення несферичного порошку вздовж сопла або його компактного розміщення в зоні спікання при СЛС.

Одним з ефективних методів зниження залишкової пористості є гаряче ізостатичне пресування, проте воно має високу вартість і може застосовуватися тільки для матеріалу, який має тільки внутрішні пори [65], [66], [67]. Так застосування гарячого ізостатичного пресування зразків із сплаву INCONEL 718 призвело до значного зменшення кількості пор, розташованих у внутрішніх об'ємах [68]. У роботі [69] для інтерметалідного сплаву Ti-6Al-4V застосування гарячого ізостатичного пресування призвело до зменшення характеристик міцності одночасно з підвищенням характеристик пластичності та ударної в'язкості.

Новим та перспективним методом зниження залишкової пористості є пластична деформація за допомогою гвинтової екструзії, яка дозволила знизити пористість по усьому перерізу напівфабрикату [70], [71], [72]. У роботі [73] показано, що при інтенсивній пластичній деформації порошкових матеріалів методом гвинтової екструзії усунення пористості також сприяло підвищенню міцності заготовки.

Усі технології інтенсивної пластичної деформації порошкових матеріалів покращують якість напівфабрикатів, форма яких далека від форми заготовок, що отримуються традиційними методами, і в результаті їм потрібна подальша тривала обробка. Слід зазначити, що для адитивного виробництва вказані технології мають дуже вузьку галузь застосування, їх можна застосовувати для покращення якості порошку або для виготовлення простих за формою напівфабрикатів після СЛС.

Не вирішеними на сьогодні завданнями при виробництві деталей, отриманих шляхом синтезу СЛС з порошкових матеріалів, є обмеження при виробництві великогабаритних деталей, значне зниження характеристик якості, внаслідок негативного впливу залишкової пористості, при наявності в їх конструкції конструктивних концентраторів напружень.

Ефективними методами щодо вирішення вказаних вище проблем при застосуванні адитивних технологій для виробництва деталей ГТД літальних апаратів є використання одного з методів пост обробки [74], [75], [76]. На сьогодні найбільшого поширення серед них дістало пневмодробоструменеве зміцнення, але воно вимагає складного та вартісного обладнання для зміцнення конструктивних концентраторів напружень [77], [78], [79]. Застосування ультразвукового зміцнення дозволяє підвищити характеристики якості деталей після гарячого ізостатичного пресування [80], але цей метод переважно використовують для напівфабрикатів. При цьому, його недоцільно використовувати для отримання складних за геометрією деталей.

Перспективною технологією обробки, яка дозволить розширити сферу застосування СЛС при виробництві деталей ГТД літальних апаратів, є алмазне вигладжування [81], [82], [83], [84].

Але, як вже було вказано раніше, ефективність застосування даного методу обробки залежить, значною мірою, від врахування схеми обробки, режимних параметрів процесу вигладжування та особливостей, пов'язаних з фізико-механічними властивостями матеріалу, з якого виготовляється деталь.

Досліджувані матеріали мають ряд особливостей, які необхідно враховувати для ефективного застосування алмазного вигладжування.

Низька пластичність одночасно з високою твердістю сплавів на основі алюмінідів титану приводить до того, що цей матеріал має підвищену крихкість. Цю проблему вирішують, різними способами: оптимізують режими обробки [85], [86], підвищують пластичність, знижуючи температуру в зоні різання та застосовуючи прогресивні охолоджуючі технологічні середовища [87], виконують легування. Так, дослідники [88], застосувавши легування ніобієм порошку із сплаву на основі алюмініду титана, змогли підвищити його жароміцність та пластичність.

Особливістю обробки деталей, отриманих за допомогою СЛС із порошку нікелевого сплаву INCONEL 718, є його висока здатність до зміцнення та утворення наросту. Основними шляхами інтенсифікації процесу обробки, в даному

випадку, є вибір раціональних режимних параметрів обробки [89], [90], дослідження їх впливу на температуру та утворення стружки у зоні різання [91]. Для підвищення характеристик міцності виконують пневмодробоструменеве зміцнення [92].

Усі вищезазначені методи лише частково вирішують вказані проблеми. Тому великого значення для підвищення сфери застосування адитивних технологій та порошкових матеріалів при виробництві деталей сучасних ГТД літальних апаратів, набуває зміцнення конструктивних концентраторів напружень алмазним вигладжуванням. Не менш важливим є питання зниження залишкової пористості та підвищення якості поверхневого шару деталей з порошкових сплавів на основі алюмінідів титану та INCONEL 718, отриманих СЛС.

1.3. Мета і задачі дослідження. Структурно-логічна схема дисертаційної роботи

Для розширення сфери застосування СЛС та обробки поверхонь конструктивних концентраторів напружень деталей ГТД літальних апаратів ефективно застосовувати обробку алмазним вигладжуванням.

Застосування СЛС для виробництва деталей ГТД літальних апаратів є перспективним рішенням щодо зменшення їх вартості та складності виробництва вказаних виробів. Ці технології в даний час знаходяться на початку свого розвитку. Інформації щодо особливостей пост обробки конструктивних концентраторів напружень деталей виготовлених за допомогою СЛС, особливо їх зміцнення алмазним вигладжуванням, майже немає. Питання розширення сфери застосування адитивних технологій та підвищення якості поверхневого шару деталей, виготовлених з нікелевих сплавів та сплавів на основі алюмініду титану, отриманих за допомогою селективного лазерного спікання, є актуальним науково–прикладним завданням.

На підставі вищевказаного для досягнення мети – підвищення якості поверхневого шару конструктивних концентраторів напружень деталей ГТД літальних апаратів – були поставлені наступні задачі:

- Виконати класифікацію конструктивних концентраторів напружень деталей ГТД літальних апаратів та визначити раціональну технологію підвищення їх якості.
- Виконати аналіз факторів, які заважають розповсюдженню адитивних технологій у виробництві, та особливостей застосування алмазного вигладжування для підвищення якості деталей ГТД літальних апаратів.
- Розробити спеціальні методики і пристрої для проведення алмазного вигладжування поверхонь та визначити раціональну геометрію алмазного вигладжувача для зміцнення конструктивних концентраторів напружень деталей ГТД літальних апаратів.
- Адаптувати методику визначення залишкових напружень методом зондувального отвору для застосування на поверхнях деталей ГТД літальних апаратів.
- Експериментально дослідити процес алмазного вигладжування з метою визначення впливу його технологічних умов та режимних параметрів зміцнення на параметри якості деталей ГТД літальних апаратів.
- Встановити основні закономірності формування параметрів якості, властивостей обробленої поверхні і поверхневого шару (шорсткість, величину деформаційного зміцнення, залишкових напружень) в залежності від режимних параметрів процесу (зусилля вигладжування, подача), геометрії алмазного вигладжувача (радіус вигладжувача), особливостей поверхневого шару (залишкова пористість) для деталей, отриманих за допомогою СЛС з різних матеріалів.
- Дослідити технологічні особливості обробки і впливу режимних параметрів алмазного вигладжування на параметри пористості при зміцненні деталей ГТД літальних апаратів, отриманих СЛС.

- Розробити технологічні рекомендації щодо застосування алмазного вигладжування для зміцнення конструктивних концентраторів напружень при виробництві деталей ГТД літальних апаратів.

Послідовність виконання експериментальних і теоретичних досліджень приведено в структурно-логічній схемі дисертаційної роботи (рис. 1.19.).

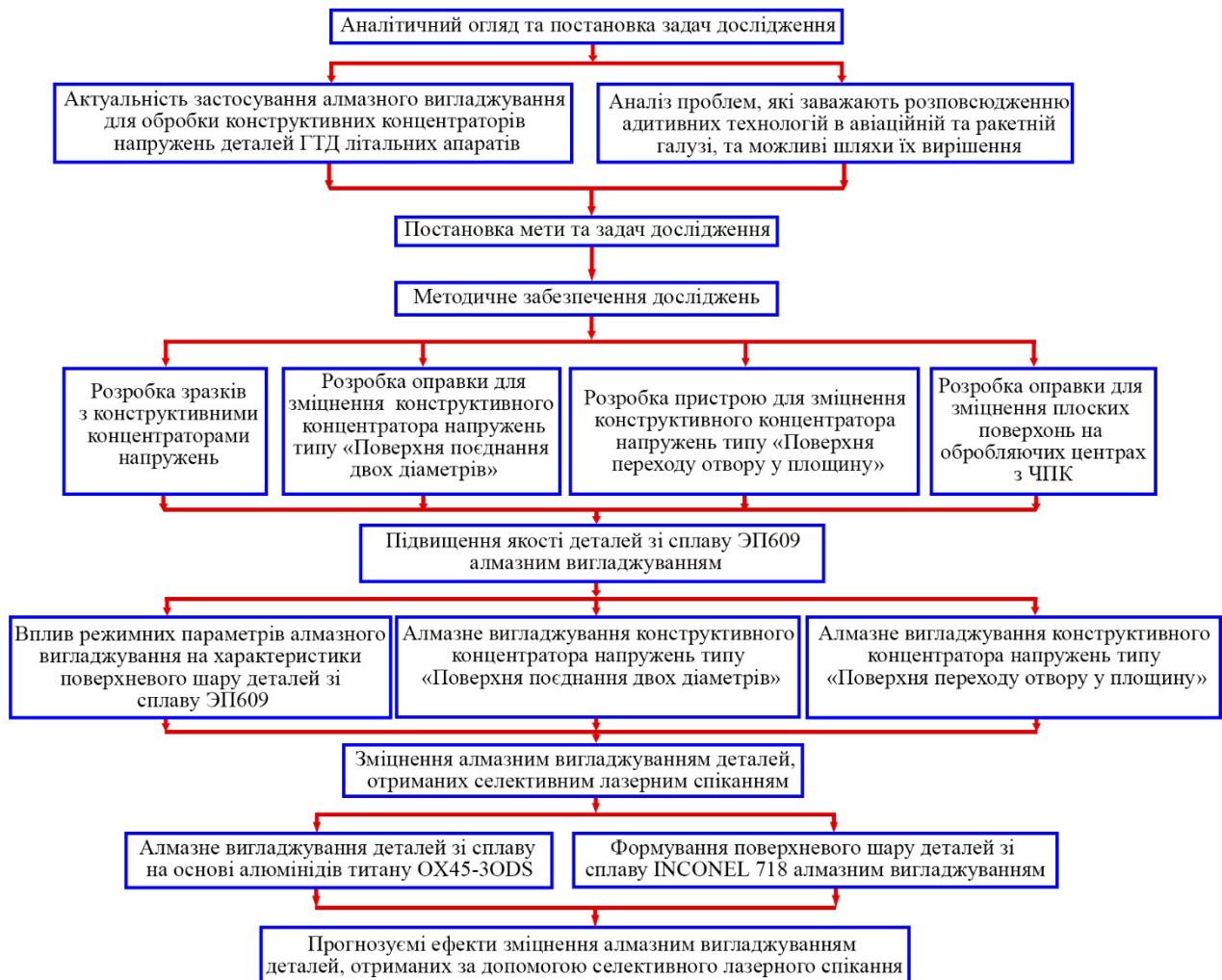


Рис. 1.19. Структурно-логічна схема дисертаційної роботи

1.4. Висновки

Аналіз літературних джерел, присвячених застосуванню адитивних технологій виготовлення деталей ГТД літальних апаратів та впливу способів обробки конструктивних концентраторів напружень на їх якість, дозволило виявити ряд факторів, які вимагають подальшого дослідження з метою розширення сфери застосування селективного лазерного спікання та покращення якості деталей ГТД літальних апаратів.

В розглянутих роботах майже не досліджено вплив конструктивних концентраторів напружень на якість деталей ГТД літальних апаратів. Питання зміцнення алмазним вигладжуванням конструктивних концентраторів напружень майже не досліджено. Відсутні системні дослідження впливу різного поєднання режимних параметрів обробки конструктивних концентраторів напружень деталей ГТД літальних апаратів на якість деталей. Відсутні дослідження щодо можливості застосування алмазного вигладжування для розширення сфери застосування адитивних технологій для виготовлення деталей ГТД літальних апаратів. Відсутні дослідження впливу на якість деталей, отриманих селективним лазерним спіканням, різного поєднання режимних параметрів алмазного вигладжування. Не досліджено питання впливу на залишкову пористість деталей ГТД літальних апаратів, отриманих селективним лазерним спіканням, алмазного вигладжування.

У зв'язку з цим вбачається необхідним подальше вивчення можливості застосування алмазного вигладжування для зміцнення конструктивних концентраторів напружень деталей ГТД літальних апаратів, отриманих селективним лазерним спіканням. Результати зазначених досліджень дозволять розробити технологічні рекомендації щодо підвищення якості зазначених деталей та розширити сферу застосування адитивних технологій у авіаційній та ракетній галузі. Виконаний аналіз дозволив сформулювати основні задачі дослідження і розробити структурно-логічну схему дисертаційної роботи.

Матеріали розділу опубліковані в наступних роботах: [14], [15], [16], [17], [23].

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Аналіз досліджуваних матеріалів

Для дослідження були обрані наступні матеріали: жароміцний сплав ЭП609-Ш, сплав на основі алюмініду титану ОХ45-3ОДС (СЛС), нікелевий сплав INCONEL 718 (СЛС).

Сплав ЭП609-Ш – це нержавіючий корозійностійкий низьковуглецевий високолегований сплав мартенситного класу. Містить хром, ванадій, нікель, ніобій та молібден у якості легуючих елементів. Має високу в'язкість та пластичність, велику здатність до зварювання. В авіаційній галузі використовується для виробництва валів та зварних деталей.

Для дослідження впливу алмазного вигладжування на деталі, отримані за допомогою СЛС, використовується порошок, виготовлений із сплавів на основі алюмініду титану ОХ45-3ОДС та жароміцного нікелевого сплаву INCONEL 718.

Інтерметалідний дисперсійно твердіючий сплав на основі алюмініду титану ОХ45-3ОДС має низьку щільність одночасно з високими механічними властивостями, що в свою чергу досить затребувано при виробництві деталей ГТД літальних апаратів. Серед негативних властивостей даного сплаву є низька пластичність та в'язкість.

Нікелевий сплав INCONEL 718 є одним із самих розповсюджених сплавів, які використовуються для СЛС. Він має одночасно з високою міцністю та корозійною стійкістю добру зварюваність. Високу міцність на розрив при температурі 700 °С. Широко використовується для виробництва деталей, працюючих при високих температурних навантаженнях. Негативною рисою даного сплаву є висока здатність до наклепу, що ускладнює обробку різанням деталей, отриманих з даного сплаву.

Хімічний склад досліджуваних матеріалів показано у табл. 2.1.

Хімічний склад досліджуваних матеріалів

Хімічний елемент	ЭП609-Ш	OX45-3ODS	INCONEL 718
Титан (Ti)	-	62,5	0,9
Алюміній (Al)	-	27,94	0,5
Магній (Mg)	-	0,42	-
Ітрій (Y)	-	0,6	-
Вуглець (C)	0,05 - 0,09	-	<0,08
Хром (Cr)	10,50 - 12,00	-	19
Нікель (Ni)	1,40 - 1,80	-	52,5
Молібден (Mo)	0,35 - 0,50	-	3
Ванадій (V)	0,15 - 0,25	-	-
Ніобій (Nb)	0,05 - 0,15	8,43	5,1
Залізо (Fe)	основа	0,11	18,86

Механічні характеристики досліджуваних матеріалів наведено у табл. 2.2

Таблиця 2.2

Механічні властивості досліджуваних матеріалів

Матеріал	Щільність, ρ , г/см ³	Модуль Юнга, E, GPa	Межа плинності, $\sigma_{0,2}$, МПа	Межа міцності, σ_B , МПа
ЭП609-Ш	7,77	194	785	930
OX45-3ODS	4,4	130	795	970
INCONEL 718	7,94	173	960	1075

Аналіз переваг та недоліків використання цих матеріалів наведено у табл. 2.3.

Характеристика досліджуваних матеріалів

Сплав	Метод отримання деталі	Переваги	Недоліки
ЭП609-Ш	Штамповка	Високі механічні властивості; жароміцність, зварюваність, пластичність	Схильність до наклепу, складність механічної обробки, чутливість до концентрації напружень.
OX45-30DS (SLS)	СЛС	Низька питома вага; високі механічні властивості; жароміцність і жаростійкість.	Низька пластичність, в'язкість, оброблюваність, чутливість дефектів, залишкова пористість, висока вартість.
INCONEL 718 (SLS)	СЛС	Низька питома вага, високі механічні властивості.	Висока вартість порошку, рівноміцність, висока схильність до наклепу, складність механічної обробки.

2.2. Зразки для експериментальних досліджень

Для дослідження впливу різних режимних параметрів АВ на якість обробленої поверхні застосовували тонкостінні зразки вирізані з натурального валу, який було виготовлено із сплаву ЭП609-Ш, вид та розмір яких показано на рис. 2.1 Виконано зміцнення АВ ділянок шириною 10 мм у осьовому напрямку.

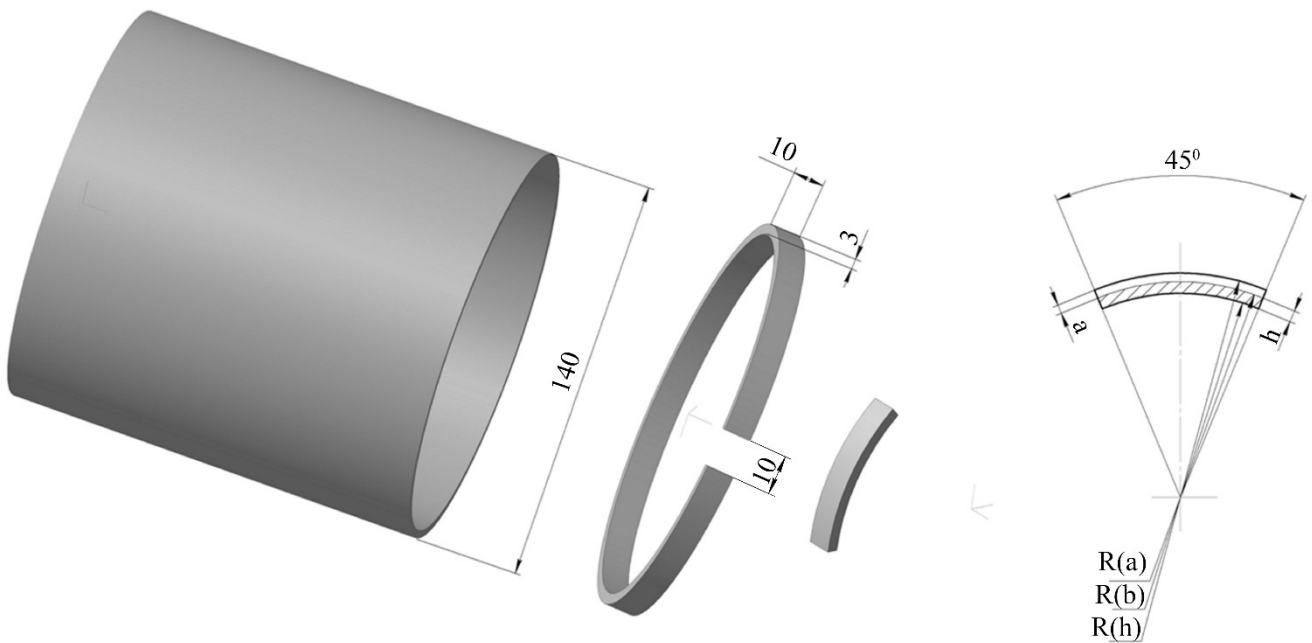


Рис. 2.1. Зразки для визначення раціонального поєднання режимних параметрів

Для визначення впливу геометрії конструктивного концентратора напружень типу «Поверхня поєднання двох діаметрів» та застосування АВ для підвищення опору втомі використовували зразки, виготовленні у відповідності до ГОСТ 25.502-79. Зовнішній вид та розміри зразка показані на рис. 2.2 [93].

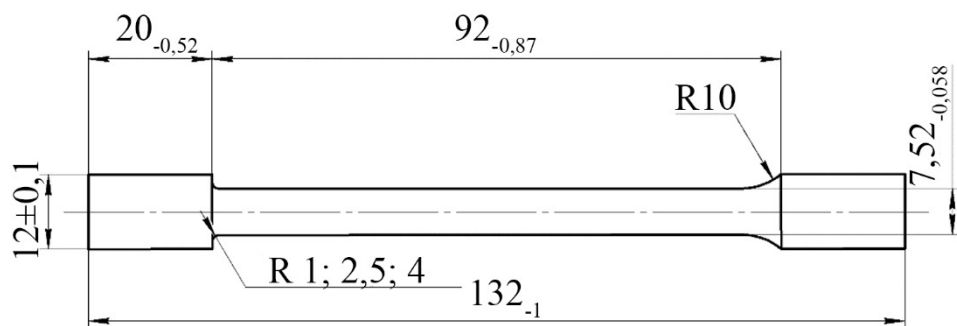


Рис. 2.2. Геометрія зразка з конструктивним концентратором напружень типу «Поверхня поєднання двох діаметрів»

Для дослідження впливу режимних параметрів АВ на якість поверхні конструктивного концентратора напружень типу «Поверхня переходу отвору у площину» було розроблено зразок, геометрія якого показана на рис. 2.3.

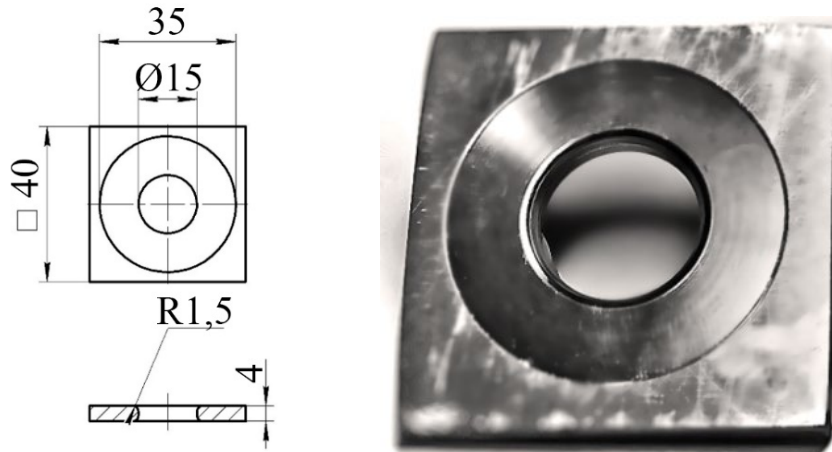
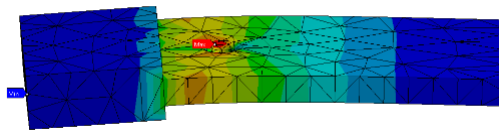
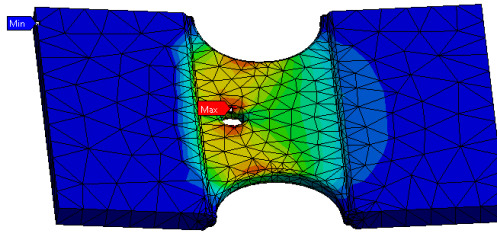


Рис. 2.3. Геометричні параметри зразка з конструктивним концентратором напружень типу «Поверхня переходу отвору у площину»

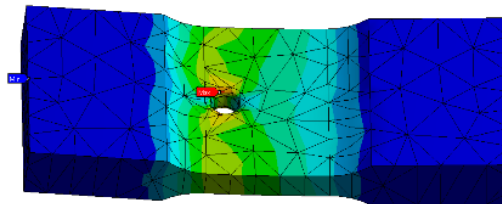
Для проведення досліджень на опір втомі, з метою оцінки ефективності застосування алмазного вигладжування для зміцнення конструктивного концентратора напружень типу «Поверхня переходу отвору у площину», необхідно розробити спеціальний зразок для досліджень. Він має відповідати наступним вимогам: простота виготовлення; максимальні напруження повинні знаходитися в зоні конструктивного концентратора напружень та перебільшувати напруження в будь-яких інших зонах більше ніж на 30%; перша частота власних коливань максимально близька до 1000 Гц; співвідношення діаметра отвору та товщини зразка повинно бути як на натурному валу. Для вирішення поставлених завдань було розроблено декілька варіантів геометричної реалізації зразків (рис. 2.4.) для яких було виконано розрахунок напружено-деформованого стану.



а



б



в

Рис. 2.4. Зразки з конструктивним концентратором напружень типу «Поверхня переходу отвору у площину»: а – виконання 1; б – виконання 2; в – виконання 3

За результатами аналізу напружено-деформованого стану було обрано виконання 3 (рис. 2.4. в), для якого максимум напружень лежить у зоні конструктивного концентратора та більше ніж на 35% перевищує значення напружень в інших зонах. Також було враховано технологічність реалізації даного зразка. Геометричні параметри зразка показані на рис. 2.5.

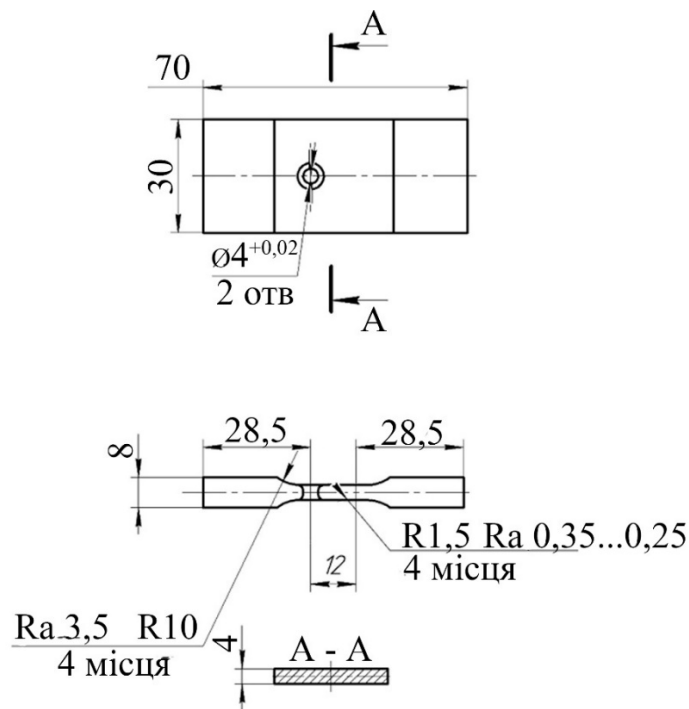


Рис. 2.5. Геометричні параметри зразка з конструктивним концентратором напружень типу «Поверхня переходу отвору у площину»

Для визначення впливу режимних параметрів алмазного вигладжування на характеристики якості поверхні та зменшення пористості порошкових матеріалів ОХ45-3ОДС та INCONEL 718 були виготовлені плоскі зразки за допомогою СЛС, форма та зовнішній вид яких показано на рис. 2.6.

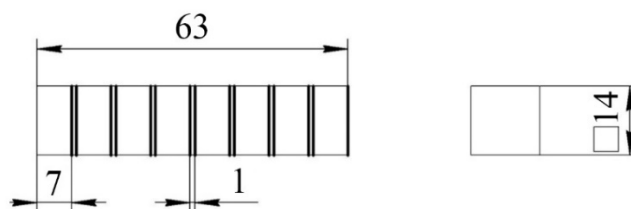


Рис. 2.6. Геометричні параметри зразка для досліджень матеріалів отриманих СЛС

На зразках (рис. 2.6.) вигладжуванню підлягали ділянки шириною 7 мм з відстанню між ними 1мм.

2.3. Устаткування для алмазного вигладжування

2.3.1. Інструмент для зміцнення

Для зміцнення досліджуваних матеріалів використовували вигладжувачі з робочою голівкою сферичної форми виконаної із синтетичного алмазу. При виготовленні кристал алмазу у вигладжувачі закріплюється пайкою, що дозволяє значно зменшити його розмір. Вигладжувач після використання та появи площадки зносу можна переточувати алмазними кругами на металевій або бакелітовій зв'язці АПВ або АЧЛ з зернистістю А50/40. Шорсткість робочої поверхні вигладжувача повинна бути не нижче Ra 0,025 – 0,08 мкм.

У табл. 2.4 показано основні фізико-механічні властивості синтетичного алмазу, вигладжувачі з якого використовувались при дослідженнях.

Таблиця 2.4

Фізико-механічні властивості синтетичного алмазу

Матеріал вигладжувача	Щільність в г/см ³	Твердість в кгс/мм ²	Модуль пружності в кгс/мм ²	Межа міцності при вигині в кгс/мм ²	Межа міцності при стисканні в кгс/мм ²	Коефіцієнт теплопровідності в кал/см×сек×град при 20°С	Питома теплоємність в кал/г×град при 20°С
Алмаз	3,50 – 3,56	10060	90×10×10 ⁴	21,49	200	0,35	0,12

Зовнішній вигляд та геометрія стандартних вигладжувачів показано на рис. 2.7.

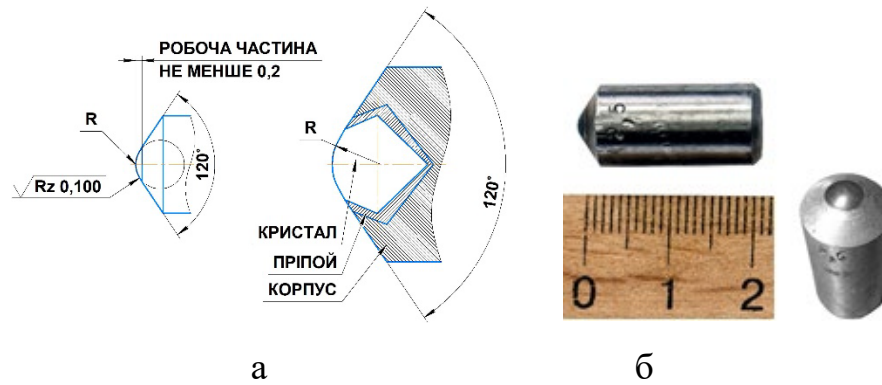


Рис. 2.7. Алмазні вигладжувачі по ТУ 2-037-631-88: а – геометричні параметри; б – вигладжувач $R_{sf}=2,5\text{мм}$

Забезпечення постійного зусилля вигладжування є обов'язковою умовою ефективного зміцнення робочої поверхні деталі. Стандартні вигладжувачі (рис. 2.7.), які випускаються промисловістю мають кут конусу 120° , у якому розташовано алмаз. Їх застосування для зміцнення конструктивних концентраторів напружень типу «Поверхня поєднання двох діаметрів» неможливо внаслідок того, що вигладжувач буде стикатиметься з поверхнею оброблюваного концентратора (рис. 2.8.).

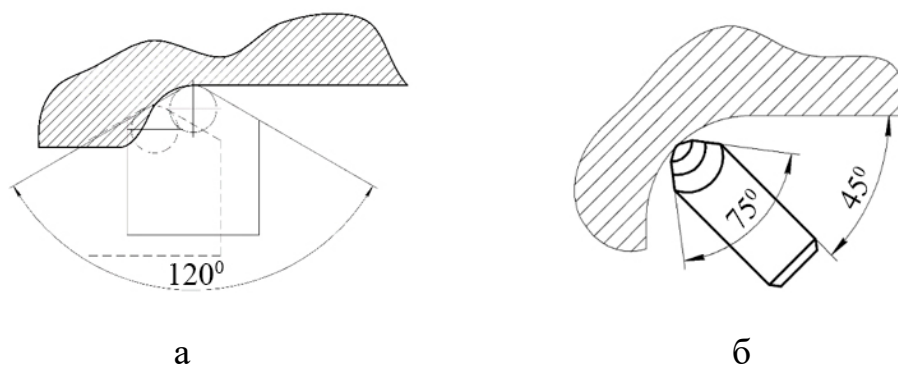


Рис. 2.8. Положення стандартного вигладжувача при обробці конструктивного концентратора напружень типу «Поверхня поєднання двох діаметрів»: а – при використанні стандартного вигладжувача; б – при використанні модифікованого вигладжувача

З метою підвищення ефективності застосування АВ для зміцнення конструктивних концентраторів напружень була виконано зміна профілю вигладжувача. Кут конусу державки було зменшено до 75° (рис. 2.9б), а сам вигладжувач під час зміцнення оброблюваної поверхні було зорієнтовано під кутом 45° (рис. 2.8. б) за допомогою спеціально спроектованого оснащення.

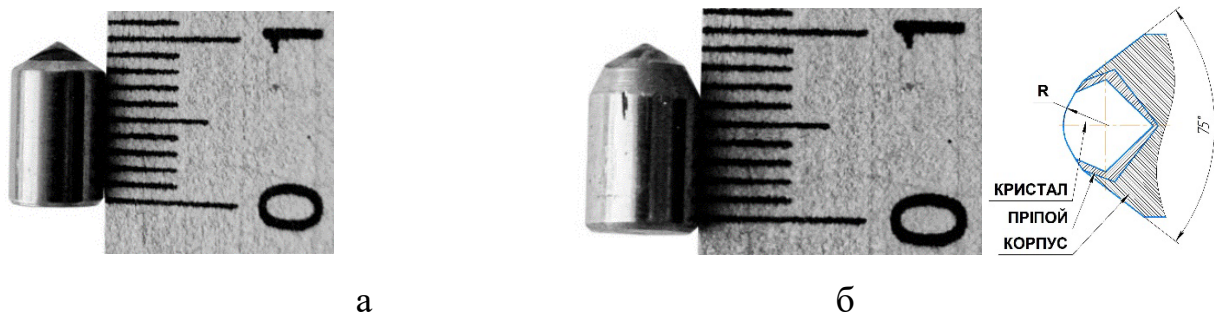


Рис. 2.9. Алмазний вигладжувач зміненої геометрії: а зовнішній вигляд стандартного вигладжувача; б – зовнішній вигляд та геометричні параметри модернізованого вигладжувача

2.3.2. Розробка оправки для зміцнення конструктивного концентратора напружень типу «Поверхня поєднання двох діаметрів»

Як вже було зазначено вище, пристрій для зміцнення конструктивного концентратора напружень типу «Поверхня поєднання двох діаметрів» повинен забезпечувати розташування алмазного вигладжувача відносно поверхні обробки під кутом 45° .

В результаті була розроблена конструкція оправки для зміцнення поверхні конструктивного концентратора напружень типу «Поверхня поєднання двох діаметрів» (рис. 2.10.), яка відповідає висунутим вимогам. Однакове зусилля вигладжування забезпечується використанням пружного елемента круглого перерізу, для забезпечення рівної жорсткості.

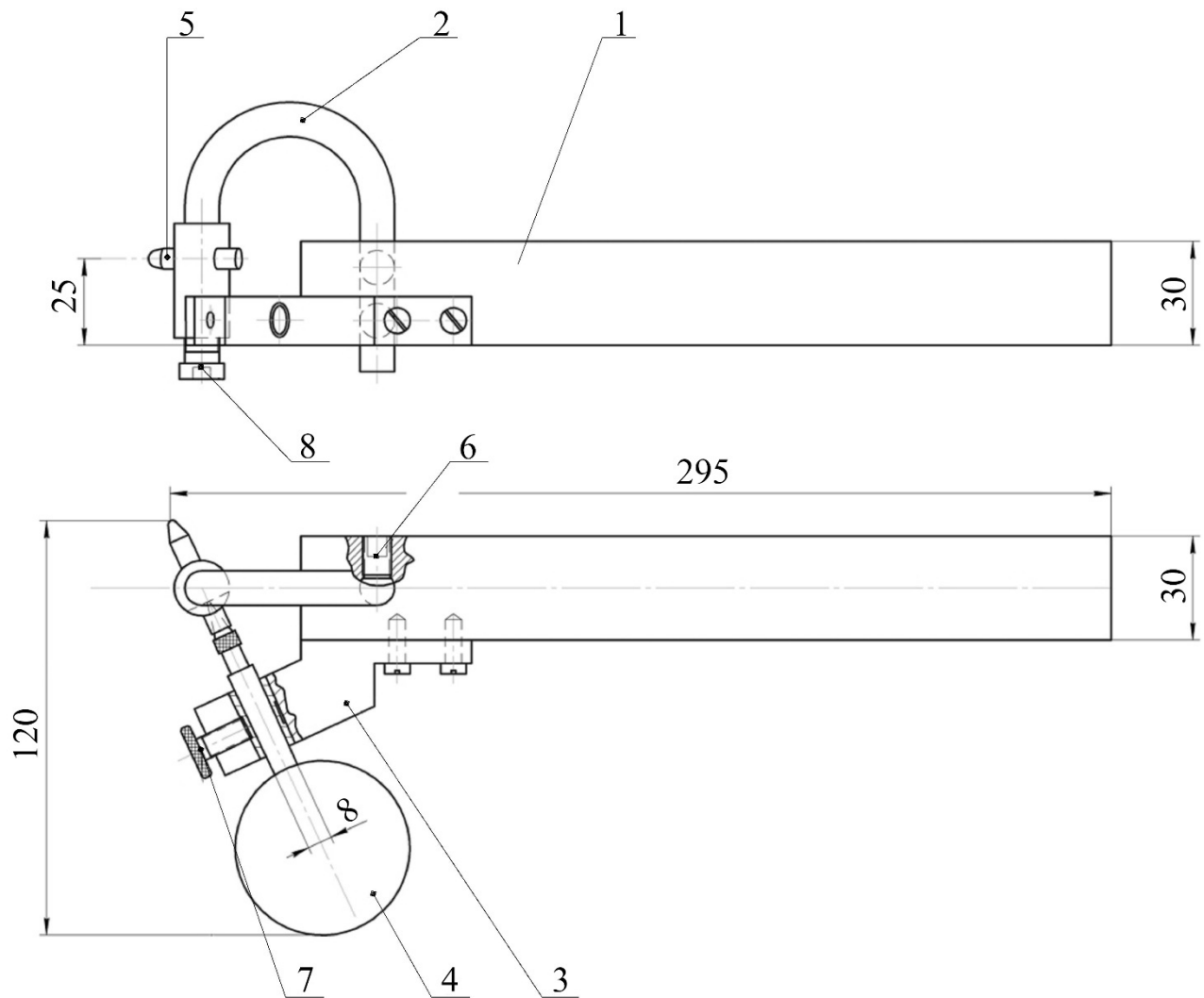


Рис. 2.10. Конструкція оправки для алмазного вигладжування конструктивного концентратора напружень типу «Поверхня поєднання двох діаметрів»

Оправка складається з державки 1, в яку встановлено пружний елемент, на якому виконана лиска, що розташована перпендикулярно осі вигладжувача, в яку упирається ніжка індикаторного годинника, для контролю сили притиснення під час обробки. Для запобігання повороту пружного елемента відносно осі оправки, він фіксується гвинтом 6. На державці 1 закріплена стійка 3, з індикаторним годинником 4.

Розроблена оправка з пружним елементом захищена авторським свідоцтвом № 36340 [94].

2.3.3. Розробка пристрою для зміцнення конструктивного концентратора напружень типу «Поверхня переходу отвору у площину»

Як зазначалося вище, радіальні й фланцеві отвори є значними концентраторами напружень, їх обробка і зміцнення супроводжується значними труднощами. Для формування та зміцнення поверхні переходу отвору у площину розроблено спеціальний пристрій (рис. 2.11.), якій може бути встановлено на робочому столі фрезерного або свердлильного верстату [95], [96].

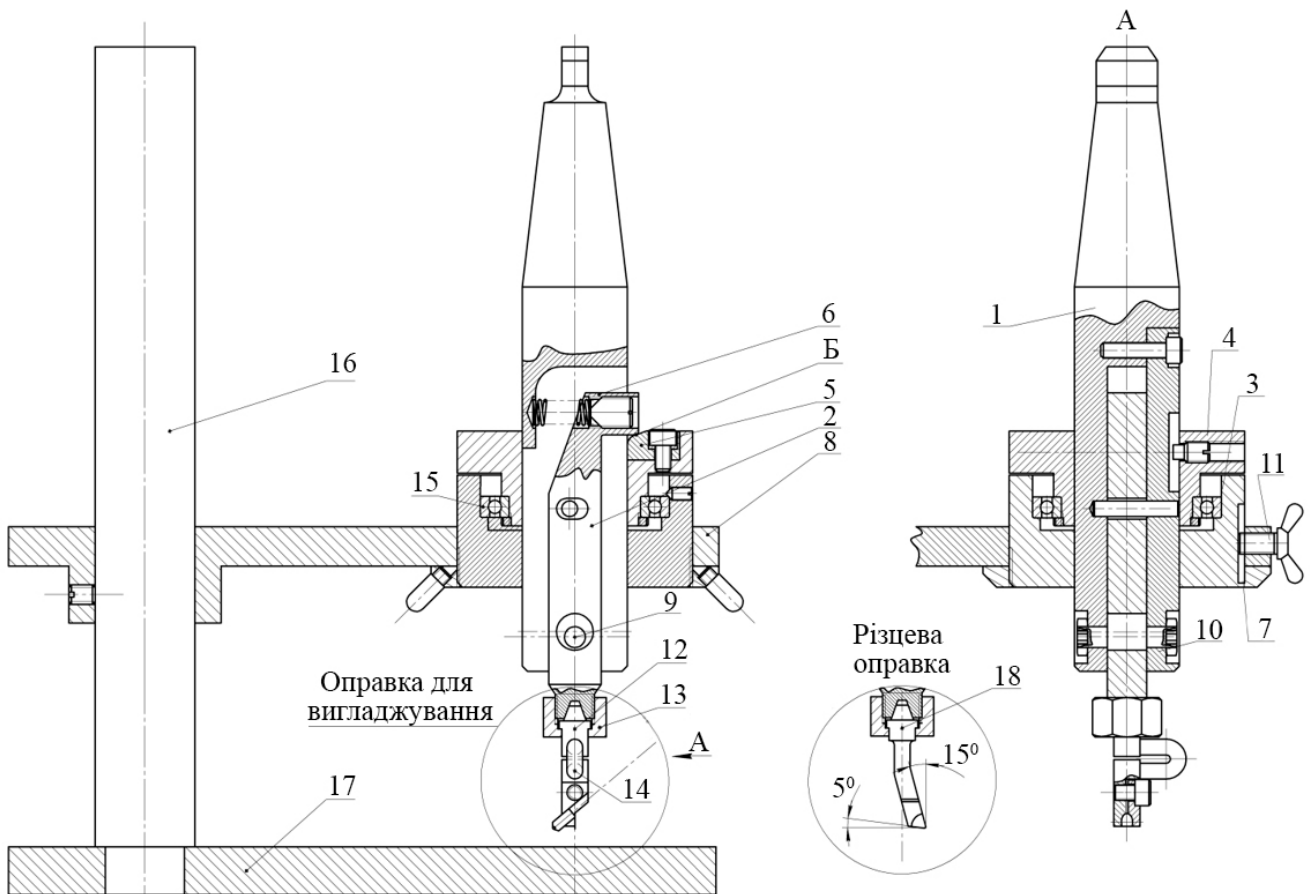


Рис. 2.11. Пристрій для обробки та зміцнення поверхні переходу отвору у площину алмазним вигладжуванням: 1 – оправка; 2 – коромисло; 3 – корпус; 4 – втулка; 5 – копір; 6 – пружина; 7 – лімба; 8 – стійка; 9 – ексцентрик; 10 – гайка; 11 – гвинт; 12 – оправка для вигладжування; 13 – гайка; 14 – пружний елемент; 15 – підшипник; 16 – стійка; 17 – основа; 18 – різцева оправка.

Виконується формування поверхні переходу отвору у площину за допомогою спеціальної різцевої оправки 18, копіра 5, пружини 6 та коромисла 2. Далі, не змінюючи базування деталі, виконується переналагодження на зміцнення за допомоги заміни на швидкозмінну оправку 12 з алмазним вигладжувачем, яка закріплена у коромислі 2 гайкою 13. Коромисло 2 знаходиться у оправці 1 та через ексцентрик 9 притискає вигладжувач до поверхні обробки. Ексцентрик 9 фіксується гайками 10.

Притискання елементу Б до копіру 5 забезпечується пружиною 6. Копір розташовано у втулці 4, яка обертається за допомогою підшипника 14, який встановлено в корпусі 3. Зусилля вигладжування забезпечується ексцентриком 9. Державка 1 базується відносно шпинделя верстату з вертикальною віссю обертання шпинделя.

Оброблювана деталь закріплюється на столі верстату в пристрої на основі 17. Особливістю використання пристрою є те, що на початку та у кінці обробки внаслідок складних умов деформування пружного елемента буде мати місце його різне пружне відтискання від поверхні обробки. Ця нерівномірність компенсується за допомогою повороту ексцентрика, внаслідок чого зміниться умовна траєкторія руху та буде компенсовано нерівномірність відтискання.

Данна конструкція пристрою дозволяє формувати та зміцнювати поверхню з'єднання використовуючи один копір, що дозволило отримати рівномірний наклеп за усією поверхнею зміцнення.

Пристрій дозволяє оброблювати та зміцнювати отвори діаметром 4 – 20 мм [97].

Розроблений пристрій захищено авторським свідоцтвом №63243 [98].

2.3.4. Оправка для зміцнення плоских поверхонь на обробляючих центрах з ЧПК

Розвиток сучасного верстатобудування, насамперед обробляючих центрів з числовим програмним керуванням, дозволяє значно розширити сферу застосування алмазного вигладжування. Стає можливим використання зазначеного методу зміцнення для обробки плоских криволінійних поверхонь. Для цього було розроблено конструкцію оправки, яку б можна було закріплювати як на звичайних вертикально-фрезерних верстатах, так і на багатокоординатних обробляючих центрах з ЧПК. Зовнішній вигляд оправки показано на рис 2.12.

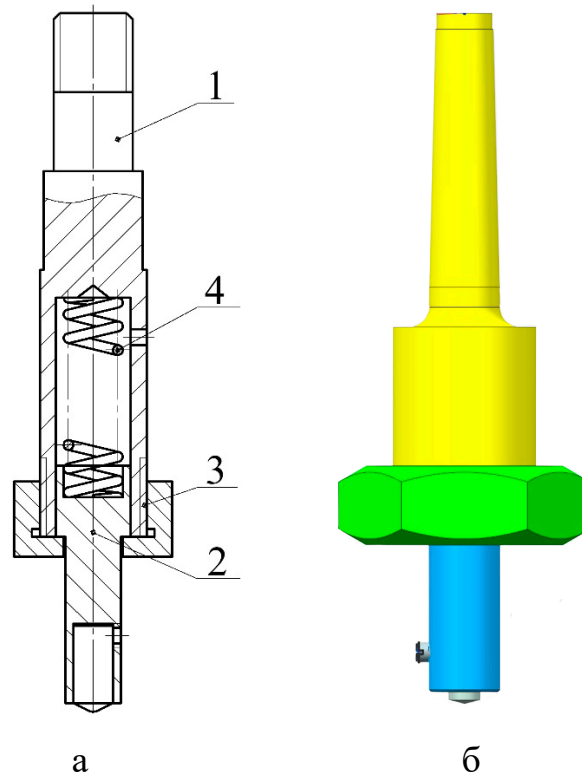


Рис. 2.12. Оправка для АВ поверхонь на багатокоординатних обробляючих центрах: а – збірне креслення; б – віртуальна модель

Оправка (рис. 2.12.) складається з державки 1, в якій розташовані пружина 4, за допомогою якої здійснюється навантаження вигладжувача, та наладка 2, в якій розташовано вигладжувач. Наладка 2 до державки 1 притискається гайкою 3.

Контроль зусилля вигладжування виконується за лімбом верстату або за допомогою програми та її корекції, якщо це обробляючий центр з числовим програмним керуванням.

2.4. Методики дослідження якості поверхні і поверхневого шару

2.4.1. Методика дослідження шорсткості

В якості контрольного параметру шорсткості було прийнято параметр середнього арифметичного відхилення профілю R_a , який був вимірюваний на профілографі-профілометрі TAYLOR HOBSON.

Шорсткість вимірювали на базі 7 мм в напрямі, перпендикулярному траєкторії обробки, до і після зміцнення алмазного вигладжування. Середнє значення шорсткості знаходили за 5 результатами вимірів.

2.4.2. Методика визначення величини мікротвердості та ступінь деформаційного зміцнення

Ступінь деформаційного зміцнення вимірювався на поверхні зразка. Методика вимірювання відповідала ДСТУ ISO 6507-1:2007. Для вимірювання використовувався мікротвердомір Віккерса моделі HVA-1, при навантаженні на індентор 100 г та часу навантаження 30 с.

Величину ступені деформаційного зміцнення розраховували за формулою

$$S_{H\mu} = \frac{S_{H\mu_{MAX}} - S_{H\mu_{ВИХ}}}{S_{H\mu_{ВИХ}}} \quad (2.1)$$

де $S_{H\mu_{max}}$ – ступінь деформаційного зміцнення поверхні досліджуваного зразка, після зміцнення алмазним вигладжуванням, МПа;

$S_{H\mu_{вих}}$ – ступінь деформаційного зміцнення, МПа.

Значення $S_{H\mu}$ визначали за таблицями і графіками [99] після визначення середньоарифметичної величини діагоналі відбитку індентора за 15-ма вимірами в різних місцях обробленої поверхні.

2.4.3. Методика дослідження розподілу залишкових напружень

Геометричні особливості деталей ГТД літальних апаратів та специфіка технологій їх виготовлення можуть призводити до формування нерівномірних високих залишкових напружень по поверхні та глибині залягання. Вони разом з технологічними та конструктивними концентраторами напружень можуть призводити до передчасного виникнення та поширення втомних тріщин при відносно невисоких циклічних напруженнях. Вимірювання залишкових напружень методом свердління зондувальних отворів має великий потенціал для сучасного будівництва ГТД літальних апаратів. В авіаційній промисловості використовується методика вимірювання залишкових напружень, заснована на пошаровому видаленні матеріалу і вимірюванні деформації зразка внаслідок напружень, що вивільнилися. Однак дана методика не може застосовуватися для складних за геометрією поверхонь деталей ГТД літальних апаратів, внаслідок складності розрахунку залишкових напружень для криволінійних поверхонь. Також вона дозволяє вимірювати напруження лише по одній осі, не надаючи інформації про розподіл напруги у тривимірному просторі. Тому знак, величину та розподіл залишкових напружень для деталей ГТД літальних апаратів після алмазного вигладжування визначали за допомогою свердління зондувального отвору та вимірювання залишкових деформацій. Визначення залишкових напружень за допомогою свердління малих отворів регламентується стандартом Американської асоціації з випробування матеріалів ASTM Standard Test Method E837-08 [100]. Однак цей стандарт не пристосовано для вимірювання напружень в тонкому поверхневому шарі.

Для визначення залишкових напружень у поверхневому шарі досліджуваних зразків використовували систему Restan MTS 2000 (рис. 2.13. а). Свердлення отвору виконувалося на високій швидкості (400000 об/хв), що значно знижує можливість наведення додаткових залишкових напружень.

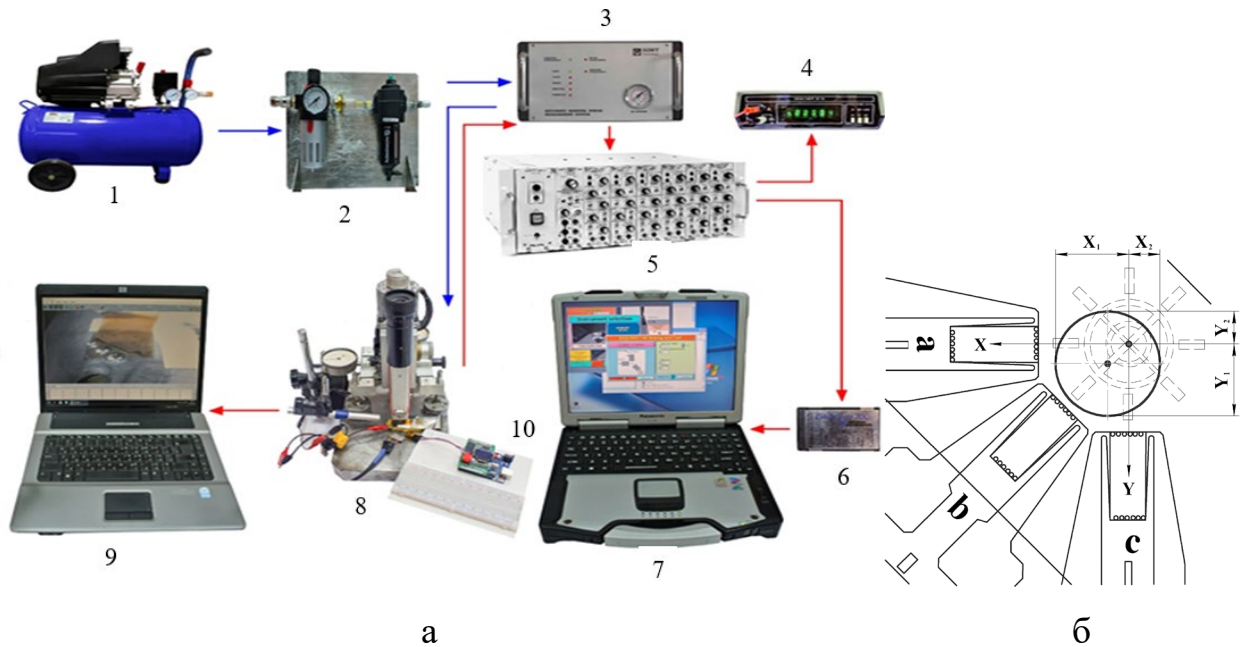


Рис. 2.13. Установка для визначення залишкових напружень методом свердління зондувальних отворів Restan MTS 2000 (а) та схема вимірювання ексцентриситету після свердління отвору (б): 1 – компресор; 2 - блок підготовки повітря; 3 - електронне обладнання SINT; 4 - цифровий мультівольтметр; 5 - аналогова тензометрична станція посилення сигналу Encore; 6 - карта DAQ - 700; 7 - ноутбук із спеціальним програмним забезпеченням; 8 - установка для виміру залишкової напруги методом свердління отворів Restan MTS2000; 9 - ноутбук показує відео із зони різання; 10 - цифровий датчик показує температуру в зоні різання; ----- сигнал; ----- повітря.

Установка показана на рис. 2.13.а складається з наступних елементів 1 – повітряний компресор, 2 – блок підготовки повітря; 3 – електронний пристрій SINT; 4 – контрольний вольтметр; 5 – тензопідсилювальна станція; 6 – аналого-

цифровий перетворювач карта DAQ-700; 7 – спеціальне програмне забезпечення; 8 – установка для вимірювання залишкових напружень Restan MTS 2000; 9 – система відео моніторингу; 10 – система моніторингу температури.

Для свердління отвору, спочатку повітря від компресору 1 та блоку підготовки повітря 2 потрапляє на електронний пристрій SINT 3, від якого воно надходить до установки для вимірювання залишкових напружень Restan MTS 2000 8. При вимірюванні установка 8 передає значення на електронний пристрій SINT 3, який через тензопідсилювальну станцію 5, контрольовану вольтметром 4, передає значення на карту DAQ-700 6 та спеціальне програмне забезпечення 7. Одночасно з процесом вимірювання цифровий датчик контролює температуру в зоні свердління отвору, а ноутбук 9 через спеціальну відеокамеру відображає процес свердління.

Великий вплив на величину деформації, що вимірюють, має точність позиціонування свердла відносно тензометричної розетки, яка складається з трьох тензометричних датчиків а, б, с рис. 2.13.б. На відповідному рисунку показано вимірювання ексцентриситету після свердління. Розміри X_1 , X_2 , Y_1 , Y_2 вводяться в спеціальне програмне забезпечення для коригування вимірюваної деформації.

Великий вплив на точність визначення залишкових напружень має підготовка тензометричних розеток. Ушкодження контактів, основи, захисної смужки, наявності заломів на розетці не допускається.

На точність вимірювання в місці установки розетки має вплив температура оточуючого середовища в процесі досліджень, та нагрівання датчика, спричинене електричним струмом, що проходить крізь нього. Оскільки жорсткість досліджуваної деталі набагато більша жорсткості розетки, то в останній при зміні температури виникатиме додаткова механічна деформація, що у свою чергу приведе до похибки вихідного сигналу. Оптимальна температура в зоні вимірювання 24...26°C.

Розрахунок напружень виконується з використанням інтегрального методу [101], [102]. Особливістю цього методу є використання спеціальних калібрувальних констант, які залежать від геометрії використаного тензодатчика,

пружних властивостей матеріалу зразка, радіусу та глибини отвору. Вони дозволяють оцінити накопичену похибку при вимірюванні деформації за глибиною від поверхні отвору на кожному кроці свердління. Ця похибка виникає внаслідок того, що деформація, яка виникає від свердління, відбувається протягом деякого часу і дуже важливо в який саме момент часу відбуватиметься вимірювання деформації. Але процес вимірювання цих констант досить складний та здебільшого беруться їх табличні значення [103], [104].

На точність визначення залишкових напружень в поверхневому шарі також впливає величина відхилення від перпендикулярності осі свердла відносно поверхні деталі в точці контакту. Наявність перекоосу призводить до спотворення величини вимірюваних залишкових напружень, особливо в поверхневому шарі (рис. 2.14.).

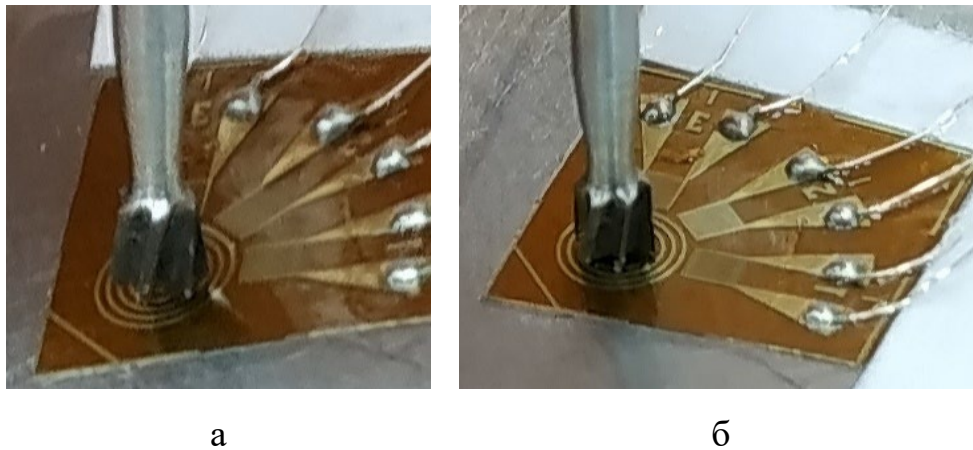


Рис. 2.14. Розташування свердла відносно вимірюваної поверхні: а – з перекоосом;
б – без перекоосу;

При аналізі даних необхідно враховувати товщину тензометричної розетки та виключати її з даних, які отримано при вимірюванні. Також має місце деяка похибка з'єднання рухливих елементів пристрою, яку теж необхідно враховувати. В результаті при аналізі даних вимірювання залишкових напружень необхідно виключати ділянку, що відповідає цим погрішностям. Ця особливість виникає через те, що вимірювання відбувається на досить малих глибинах близько 0,7 мм,

стандартна ж методика призначена для деталей, що мають товщину значно більшу за 1 мм.

Програмне забезпечення, що включає комплекс визначення залишкових напружень Restan MTS 2000, дозволяє отримати інформацію про зміну деформації по трьох напрямках – величини максимального і мінімального напруження та головного куту α і його зміни по глибині.

Для достовірної оцінки розподілу залишкових напружень необхідно виконувати вимірювання одразу по трьох напрямках дії головних напружень, оскільки, якщо враховувати тільки дію головної напруги, це може давати велику похибку [105].

2.5. Методика дослідження параметрів пористості

Дослідження параметрів пористості виконувалось на основі аналізу зображень поверхонь металографічних шліфів за ГОСТ 9391-80. При аналізі використовували програмне забезпечення Image Pro Plus. Спочатку виконується калібрування зображення, яке підлягає аналізу, відносно розмірної сітки програмного забезпечення. Потім обираються параметри, які необхідно дослідити. Зазначене програмне забезпечення, аналізуючи зображення, розбиває його на темні та світлі ділянки. Темні ділянки відповідають наявним порам. Окремо виконується аналіз параметрів пор, на основі аналізу їх форми. Великий вплив на точність аналізу має контрастність зображення, тому необхідна попередня обробка зображення з метою посилення різниці між світлими та темними ділянками.

2.6. Методика дослідження на опір втомі

Дослідження на опір втомі виконували за методом ступінчатого збільшення навантаження. Дослідження виконують до руйнування всіх зразків. База

випробувань 2×10^7 циклів, амплітуда напруження для першого рівня навантаження $\sigma_H = 320 \text{ МПа}$, $\Delta\sigma = 20 \text{ МПа}$.

Базування та закріплення зразка за наладкою виконується в затискному пристрої (рис. 2.15.), який встановлюється в головку вібратору 1 віброелектродинамічного стенду ВЕДС-200. Дослідження виконують відповідно до ГОСТ 25.502-79.

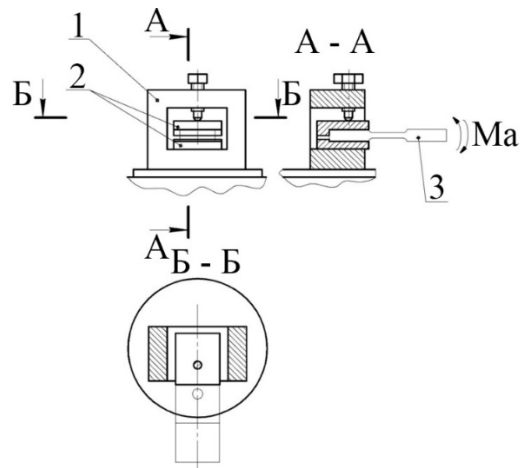


Рис. 2.15. Схема закріплення зразка в голівці вібростенда.

Зразки, які підлягають дослідженню, розташовуються у спеціальних наладках (рис. 2.16.).

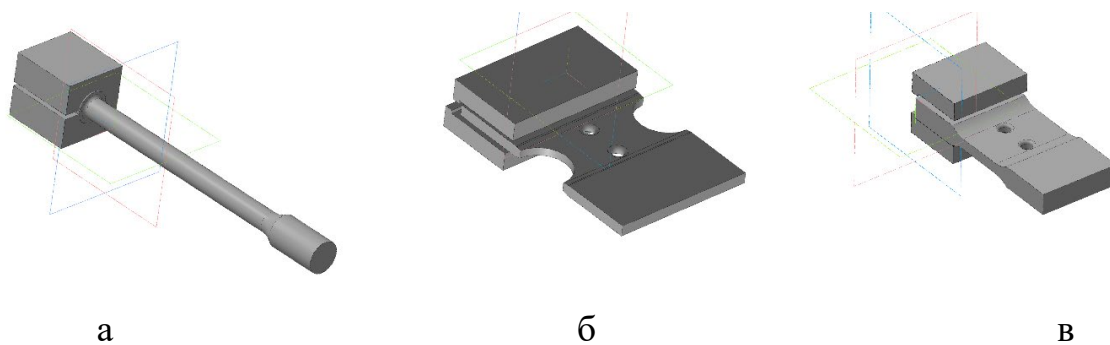


Рис. 2.16. Схеми закріплення зразків для проведення випробувань на втому: а – замок для закріплення циліндричного зразка; б и в – замки для закріплення плоских зразків

Перед проведенням випробувань виконують динамічне тарування зразків при температурі 20°C для встановлення залежності напруження у досліджуваному концентраторі від амплітуди коливань. Рядом з конструктивним концентратором напружень (рис. 2.17.) приклеюються попередньо відкалібровані тензOMETричні датчики.

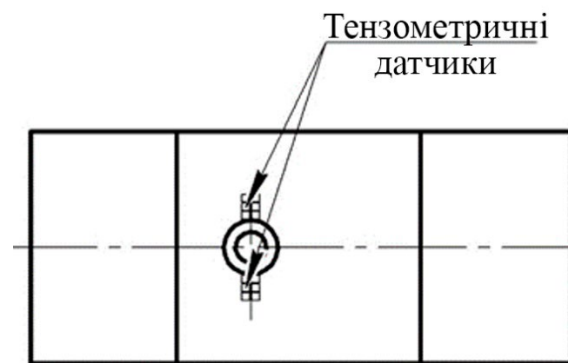


Рис. 2.17 – Схема препарування зразка.

Під час тарування амплітуду коливань зразка обирають такою, щоби напруження в зоні концентратора дозволяли йому відстояти повну базу випробувань 20×10^7 циклів без руйнування.

Оцінку руйнації зразка виконують по появі тріщини втомі та зниженню частоти власних коливань зразка в момент появи тріщини.

За результатами досліджень будується криві втомі у напівлогарифмічних координатах $\sigma - \lg(N)$.

2.7. Методика дослідження напружено-деформованого стану

Аналіз напружено-деформованого стану за методом кінцевих елементів (МКЕ) виконували для типових деталей двигуна ГТД літального апарату. Геометричні моделі деталей були виконані в системі «Unigraphics» та імпортовані

в програмний комплекс ANSYS WORKBENCH за допомогою формату IGES. Для створення кінцево-елементних моделей використовували сітковий генератор IСЕМ CFD. Для побудови сітки кінцевих елементів використали об'ємний кінцевий елемент SOLID 186 (двадцятивузловий гексагональний). Зважаючи на складну геометрію досліджуваних деталей було виконано згущування розрахункової сітки в місцях передбачуваної концентрації напруги. За результатами розрахунку було отримано величину максимальних напружень від прикладених навантажень в досліджуваних деталях.

2.8. Методика статистичної обробки

Статистичну обробку та побудову математичних моделей виконували в програмному забезпеченні STATSOFT на основі аналізу експериментальних даних повнофакторних та дробових експериментів. Обробку виконували на основі даних кореляційного, дисперсійного та регресійного аналізу. Встановлення взаємозв'язка між досліджуваними факторами виконували на основі кореляційного аналізу за яким встановлювали незалежні один від одного фактори, для яких виконувались подальші дослідження. Подальшим кроком статистичної обробки було виконання дисперсійного та аналізу діаграм Парето для встановлення найбільш вагомих факторів, які мають найбільший вплив на цільову функцію. В результаті виконання аналізу множинної регресії було визначені коефіцієнти множинної регресії та побудовані математичні моделі. Для перевірки адекватності одержаних моделей виконували оцінку однорідності дисперсії адекватності та дисперсії відтворюваності моделі з використанням F-критерію Фішера. Оскільки кількість дослідів експериментального плану більша за кількість оцінюваних коефіцієнтів регресії математичної моделі, план експерименту був ненасиченим. Для визначення дисперсії відтворюваності S_y^2 виконували триразове дублювання 11 дослідів у центрі плану експерименту. Її однорідність оцінювали за критерієм Кохрена.

Значення дисперсії відтворюваності розраховували за формулою:

$$S_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^n (F_{i,j}^{\text{досл}} - \overline{F_i^{\text{досл}}})^2}{N(n-1)} \quad (2.2)$$

де N – кількість дублюючих дослідів;

n – кількість повторень кожного дослідів;

Значення дисперсії адекватності моделі, враховуючи рівномірне дублювання дослідів, розраховували за формулою:

$$S_{\text{ад}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N n (T^{\text{розр}} - \overline{T^{\text{досл}}})^2}{f_{\text{ад}}} \quad (2.3)$$

де n – кількість дублюючих дослідів в кожній серії;

$T^{\text{розр}}$ – розрахункове значення досліджуваного параметру;

$\overline{T^{\text{досл}}}$ – середнє значення досліджуваного параметра за результатами дублювання дослідів;

$f_{\text{ад}}$ – кількість ступенів волі.

Однорідність дисперсії відтворюваності оцінювали за допомоги критерія Фішера:

$$F^{\text{розр}} = \frac{S_{\text{ад}}^2}{S_y^2} \quad (2.4)$$

2.9. Висновки

1. Визначені основні методичні прийоми дослідження параметрів якості поверхні та властивостей поверхневого шару після зміцнення алмазним вигладжуванням.

2. Методику визначення залишкових напружень за допомогою зондувального отвору адаптовано до вимірювання на поверхнях деталей ГТД літальних апаратів.

3. Розроблено та описано спеціальне оснащення для проведення досліджень впливу режимних параметрів алмазного вигладжування на опір втомі.

4. Розроблені спеціальні зразки з конструктивними концентраторами напружень типу «Поверхня переходу отвору у площину», описано основні умови та характеристики проведення досліджень з ними.

5. Розроблена конструкція оригінальної оправки для локального зміцнення алмазним вигладжуванням конструктивного концентратора напружень типу «Поверхня поєднання двох діаметрів».

6. Розроблена конструкція оригінального пристрою для формування поверхні конструктивного концентратора напружень типу «Поверхня переходу отвору у площину» та його подальшого локального зміцнення алмазним вигладжуванням.

7. Розроблена конструкція оригінальної оправки для локального зміцнення алмазним вигладжуванням площинних поверхонь на обробляючих центрах з ЧПК.

Матеріали розділу опубліковані в наступних роботах: [93], [94], [95], [96], [97], [98], [105].

РОЗДІЛ 3

ЗМІЦНЕННЯ АЛМАЗНИМ ВИГЛАДЖУВАННЯМ ДЕТАЛЕЙ, ВИГОТОВЛЕНИХ ЗІ СПЛАВУ ЕП609-Ш

3.1. Вплив режимних параметрів алмазного вигладжування на характеристики поверхневого шару деталей зі сплаву ЕП609-Ш

Параметри якості поверхневого шару поверхонь конструктивних концентраторів напружень деталей із сплаву ЕП609-Ш формуються на протязі їх обробки різанням. На результат після обробки великий вплив має технологічна спадковість. Для підвищення якості деталей та зниження впливу на неї конструктивних концентраторів напружень актуальною задачею є встановлення закономірностей впливу на параметри якості поверхневого шару режимних параметрів локального зміцнення алмазним вигладжуванням.

3.1.1. Формування алмазним вигладжуванням якості поверхневого шару деталі

Дослідження впливу режимних параметрів алмазного вигладжування на якість поверхневого шару деталі, виготовленої із сплаву ЕП609-Ш, дозволить визначити їх раціональне поєднання, при яких досягається мінімальна шорсткість.

Алмазне вигладжування виконували на циліндричній втулці діаметром 146 мм, з товщиною стінки 4 мм, яка була вирізана з натурального валу. Попередня обробка поверхні відповідала базовому технологічному процесу виготовлення деталі. На втулці вигладжували ділянки шириною 10 мм, на яких потім виконувалося вимірювання шорсткості в осьовому напрямку.

Для знаходження раціонального поєднання режимних параметрів алмазного вигладжування було проведено повнофакторний експеримент плану 3^k при $k=3$.

Режимні параметри та результати вимірювання шорсткості Ra алмазного вигладжування приведені в табл. 3.1 [106].

Таблиця 3.1

Режимні параметри алмазного вигладжування зразків зі сталі ЭП609-Ш

№ з/п	F, (Н)	S, (мм/об)	v, (м/хв)	Ra, (мкм)	№ з/п	F, (Н)	S, (мм/об)	v, (м/хв)	Ra, (мкм)
1	200	0,03	37	0,59	15	300	0,05	145	0,33
2	200	0,03	92	0,50	16	300	0,07	37	0,36
3	200	0,03	145	0,48	17	300	0,07	92	0,25
4	200	0,05	37	0,47	18	300	0,07	145	0,23
5	200	0,05	92	0,38	19	400	0,03	37	0,86
6	200	0,05	145	0,35	20	400	0,03	92	0,70
7	200	0,07	37	0,42	21	400	0,03	145	0,69
8	200	0,07	92	0,38	22	400	0,05	37	0,65
9	200	0,07	145	0,32	23	400	0,05	92	0,55
10	300	0,03	37	0,52	24	400	0,05	145	0,53
11	300	0,03	92	0,41	25	400	0,07	37	0,42
12	300	0,03	145	0,37	26	400	0,07	92	0,36
13	300	0,05	37	0,56	27	400	0,07	145	0,38
14	300	0,05	92	0,35					

В якості факторів варіювання обрані наступні режимні параметри: зусилля вигладжування F, подача вигладжування S, швидкість вигладжування V. В ролі цільової функції обрано параметр шорсткості Ra.

Матриця повнофакторного експерименту показана в таблиці 3.2.

Матриця повнофакторного експерименту 3^k при $k=3$

№ з/П	F, (Н)	S, (мм/об)	v, (м/хв)	Ra, (мкм)	№ з/П	F, (Н)	S, (мм/об)	v, (м/хв)	Ra, (мкм)
1	-1	-1	-1	0,59	15	0	0	1	0,33
2	-1	-1	0	0,50	16	0	1	-1	0,36
3	-1	-1	1	0,48	17	0	1	0	0,25
4	-1	0	-1	0,47	18	0	1	1	0,23
5	-1	0	0	0,38	19	1	-1	-1	0,86
6	-1	0	1	0,35	20	1	-1	0	0,70
7	-1	1	-1	0,42	21	1	-1	1	0,69
8	-1	1	0	0,38	22	1	0	-1	0,65
9	-1	1	1	0,32	23	1	0	0	0,55
10	0	-1	-1	0,52	24	1	0	1	0,53
11	0	-1	0	0,41	25	1	1	-1	0,42
12	0	-1	1	0,37	26	1	1	0	0,36
13	0	0	-1	0,56	27	1	1	1	0,38
14	0	0	0	0,35					

За допомогою кореляційного аналізу визначали характер взаємодії між факторами варіювання. Оскільки залежність між режимними параметрами носить нелінійний характер та на їх розподіл оказує вплив велика кількість факторів, в тому числі непрогнозованих, то був використаний непараметричний коефіцієнт кореляції Спірмена. За допомогою статистичної обробки отримано кореляційну матрицю показників, які характеризують взаємозв'язок режимних параметрів алмазного вигладжування та параметра шорсткості Ra. Результат кореляційного аналізу показано в табл. 3.3.

Таблиця 3.3

Кореляційна матриця взаємозв'язку показників режимних параметрів алмазного вигладжування та шорсткості

Параметри	F, кН	S, мм/об	V, м/хв	Ra, мкм
F	1,0	-0,0	0,0	0,392699
S	-0,0	1,0	0,0	-0,628318
v	0,0	0,0	1,0	-0,369254
Ra	0,392699	-0,628318	-0,369254	1,0

Як вбачається з даних табл. 3.3 режимні параметри алмазного вигладжування не мають між собою взаємозв'язку, але мають сильний кореляційний взаємозв'язок та вплив на параметр шорсткості Ra. За допомогою дисперсійного (табл. 3.4) аналізу визначили ступінь впливу кожного з факторів варіювання (режимних параметрів) на цільову функцію Ra.

Таблиця 3.4

Дисперсійний аналіз впливу режимних параметрів на шорсткість

Фактор	SS	df	MS	F	p
(1)F, Н(Q)	0,746713	1	0,746713	28,66888	0,000026
(2)S, мм/об(L)	0,432450	1	0,432450	16,60324	0,000543
S, мм/об(Q)	0,172269	1	0,172269	6,61398	0,017780
(3)v, об/хв(L)	1,227222	1	1,227222	47,11728	0,000001
v, об/хв(Q)	0,261768	1	0,261768	10,05017	0,004611
Error	0,546969	21	0,026046		
Total SS	3,401541	26			

Шляхом дисперсійного аналізу визначено, що найменший вплив на шорсткість мала подача, що досить прогнозовано, оскільки варіювання подачею було виконано в досить невеликих межах 0,03-0,07 мм/об, оскільки відомо, що подальше збільшення подачі призведе до значного погіршення шорсткості. Взагалі

з обраних режимних параметрів найбільший вплив мала швидкість вигладжування. Це відбувається внаслідок того, що частота обертів має безпосередній вплив на зношування вигладжувача та температуру у зоні його контакту з поверхнею обробки, що в свою чергу призведе до погіршення шорсткості.

На графіку середніх значень (рис. 3.1.) показаний характер впливу режимних параметрів на шорсткість.

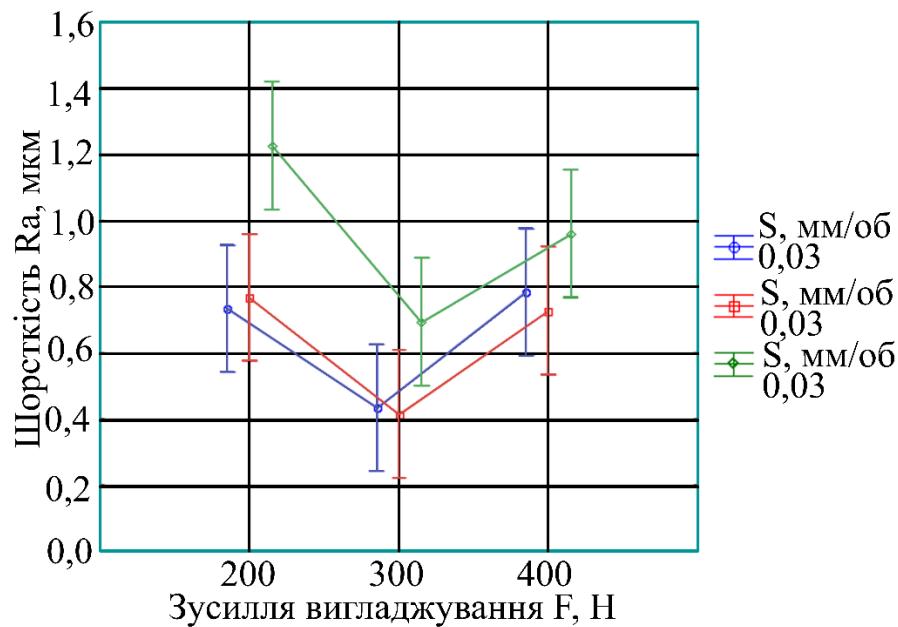


Рисунок 3.1. Вплив режимних параметрів алмазного вигладжування на шорсткість поверхні зразків

Як можна бачити з рис. 3.1 вплив режимних параметрів на параметр шорсткості R_a носить нелінійний характер з ярко вираженим оптимумом.

На графіку передбачуваних та спостережуваних значень показано наскільки експериментальні данні відрізняються від розрахункових (рис. 3.2.).

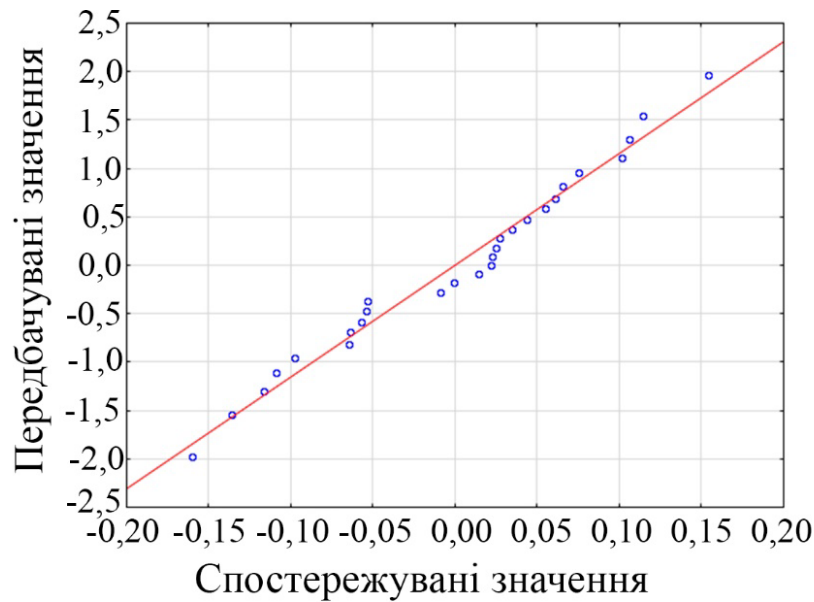


Рисунок 3.2. Відповідність передбачуваних значень спостережуваним значенням

Оскільки експериментальні та розрахункові значення (рис. 3.2) мають досить невелику розбіжність, то модель, яка використовувалась при статистичній обробці, є вірною. За допомогою статистичної обробки в програмному комплексі Statistica було визначено раціональне поєднання режимних параметрів, при якому шорсткість буде мінімальною. Результат показано у табл. 3.5.

Таблиця 3.5

Критичні значення режимних параметрів

Фактор	Критичні значення; Параметр: Ra, мкм		
	Мінімум	Критичне значення	Максимум
F, кН	200,0000	306,0630	400,0000
S, мм/об	0,0300	0,0409	0,0700
v, м/хв	37,0000	115,9043	145,0000

Статистично підтвердженим (табл. 3.5) поєднанням режимних параметрів, при яких шорсткість буде мати мінімальне значення, буде: зусилля вигладжування

$F=306$ Н; подача вигладжування $S= 0.04$ мм/об; швидкість вигладжування $n=115$ м/хв. Але слід зазначити, що раціональне поєднання режимних параметрів отримано внаслідок статистичної обробки, тому їх величини можуть корегуватися в залежності від можливостей обладнання, що використовується.

3.1.2. Дослідження впливу режимних параметрів алмазного вигладжування на величину ступені деформаційного зміцнення

Однією з важливих характеристик якості поверхневого шару, яка оказує великий вплив на зносостійкість та опір контактній втомі, є ступінь деформаційного зміцнення. Алмазне вигладжування супроводжується великою ступеню локальної пластичної деформації в поверхневому шарі деталі при зміцненні, що приводить до збільшення деформаційного зміцнення. Його величина залежить від режимних параметрів процесу зміцнення, оскільки при раціональному їх поєднанні ступінь деформаційного зміцнення буде збільшуватися, а при нераціональному, навпаки, зменшуватися та навіть призвести до розміцнення поверхневого шару.

Було досліджено вплив різного поєднання режимних параметрів алмазного вигладжування на ступінь деформаційного зміцнення поверхневого шару.

З метою економії часу та матеріальних ресурсів мікротвердість та ступінь деформаційного зміцнення вимірювались для найбільш характерних поєднань режимних параметрів, визначених у попередніх дослідженнях.

Для дослідження були обрані наступні режимні параметри: зусилля вигладжування F , подача вигладжування S , швидкість вигладжування v . В ролі цільової функції було обрано параметр ступінь деформаційного зміцнення $S_{\text{нц}}$.

Результати експериментального дослідження показано в табл. 3.5.

Режими АВ зразків та результати вимірювання степені деформаційного зміцнення

№ з/п	Зусилля, F, Н	Подача, S, мм/об	Швидкість, v, м/хв	Мікротвердість HV, МПа	S _{нм} , %
1	Вихідний без зміцнення			3600	—
2	100	0,07	92	3950	10,0
3	200	0.07	92	4460	24,0
4	300	0.07	92	4730	31,0
5	400	0.07	92	4920	37,0
6	200	0.12	92	4180	16,0
7	200	0,05	92	4510	25,0
8	200	0,07	37	4480	24,5
9	200	0,07	145	4330	20,0
10	200	0,07	184	4300	19,4

Встановлено, що варіювання параметрів алмазного вигладжування в досліджуваних межах (табл. 3.5) призвели до формування деформаційного зміцнення поверхневого шару у досить широкому діапазоні. Розбіжність за величиною ступеня деформаційного зміцнення склала від 10 до 37%.

Досліджувані режимні параметри по-різному впливають на значення деформаційного зміцнення (рис. 3.4.). Так із збільшенням зусилля вигладжування F (рис. 3.4. а), значення степені деформаційного зміцнення збільшується, це слушно у досліджуваному діапазоні. Однак, підвищення зусилля може призвести до явища розміцнення поверхневого шару.

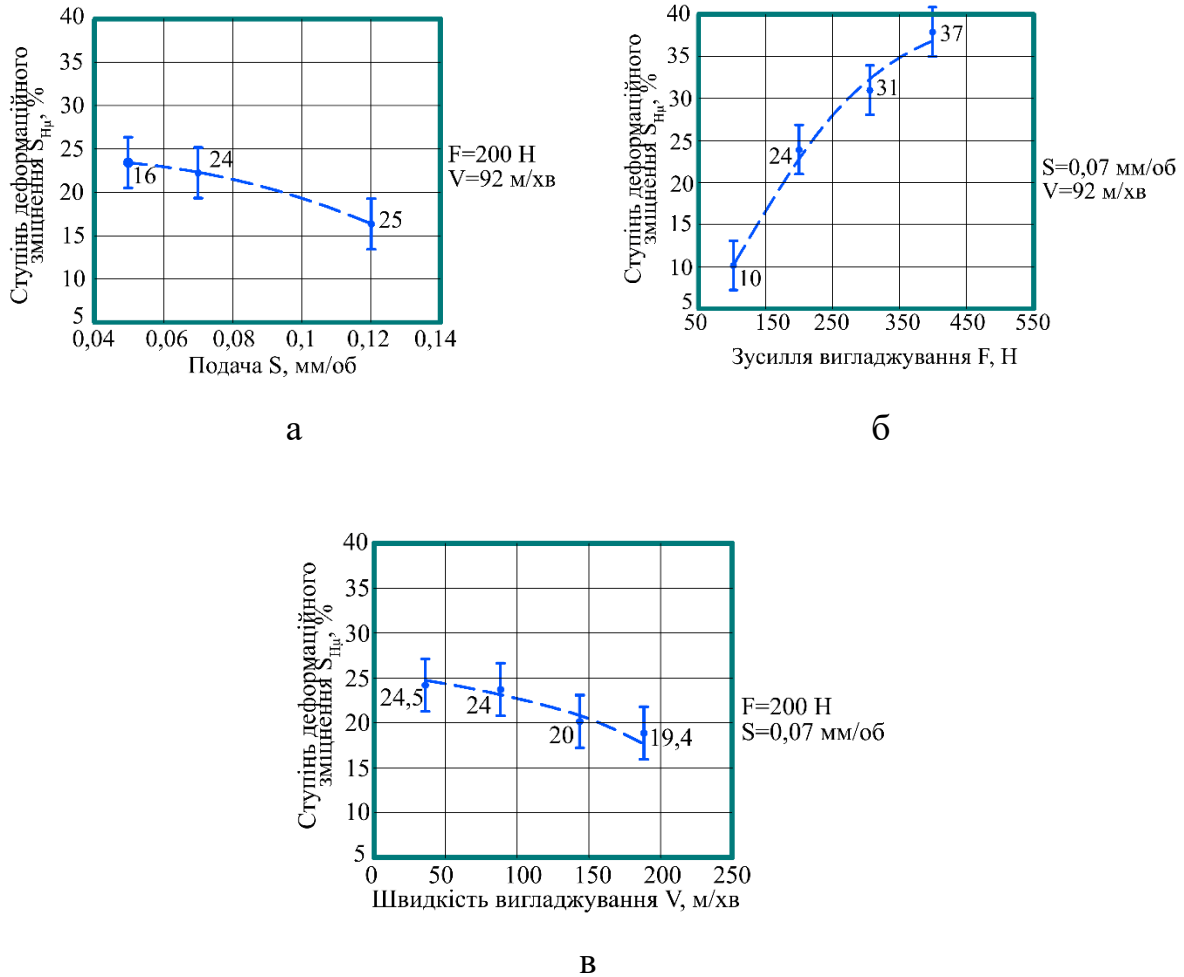


Рис. 3.4. Вплив режимних параметрів алмазного вигладжування на ступінь деформаційного зміцнення поверхневого шару зразків

Встановлено, що зі збільшенням подачі вигладжування (рис. 3.4. б) величина ступеня деформаційного зміцнення зменшується, це пояснюється недостатнім перекриттям канавок від алмазного вигладжування та, як результат, зменшенням силового впливу від вигладжувача на поверхню, що обробляється. Збільшення швидкості вигладжування (рис. 3.4. в) призводить до зменшення ступеня деформаційного зміцнення, що відбувається внаслідок пришвидшення переміщення вигладжувача та зменшення часу його контакту з поверхнею, яка обробляється, за одиницю часу.

За допомогою аналізу множинної регресії визначено який з режимних параметрів алмазного вигладжування найбільше впливає на ступінь деформаційного зміцнення $S_{\text{Нц}}$. Результат показано у табл. 3.6.

Вагомість факторів варіювання на цільову функцію $S_{H\mu}$

N=9	Підсумки регресії для залежної змінної: $S_{H\mu}$					
	БЕТА	Стд. Пом. БЕТА	B	Стд. Пом. B	t(5)	p-рівень
Вільний член			16,259	4,19096	3,87949	0,011648
F	0,895892	0,091985	0,086	0,00879	9,73959	0,000194
S	-0,287277	0,091848	-122,269	39,09186	-3,12773	0,026024
v	-0,167768	0,091963	-0,015	0,00823	-1,82431	0,127700

Найбільший вплив з режимних параметрів алмазного вигладжування (табл. 3.6) на ступінь деформаційного зміцнення поверхневого шару має зусилля вигладжування. Швидкість різання навпаки не має суттєвого впливу. При збільшенні зусилля вигладжування до 400 Н ступінь деформаційного зміцнення склала 37%. В той же час збільшення швидкості з 37 м/хв до 184 м/хв призвела до зменшення ступені деформаційного зміцнення на 5%.

3.1.3. Дослідження впливу режимних параметрів алмазного вигладжування на розподіл залишкових напружень

Одним із значимих факторів, які мають великий вплив на вірогідність появи та розповсюдження тріщини втомі є характер та величина залишкових напружень. При дослідженні залишкових напружень була використана методика визначення залишкових напружень методом свердління зондувального отвору, яку було раціоналізовано для вимірювання залишкових напружень для тонкостінних деталей. Виконано дослідження впливу режимних параметрів алмазного вигладжування (табл. 3.7) на величину, характер та розподіл залишкових напружень у поверхневому шарі зразків із сплаву ЭП609-Ш [107].

Режимні параметри алмазного вигладжування

№ з/п	Зусилля, F, Н	Подача, S, мм/об	Швидкість, v, м/хв	Радіус сфери вигладжувача R _{sf} , мм
1	Вихідний без зміцнення			-
2	100	0,07	92	2,5
3	200	0.07	92	2,5
4	300	0.07	92	2,5
5	400	0.07	92	2,5
6	200	0.12	92	2,5
7	200	0,05	92	2,5
8	200	0,07	37	2,5
9	200	0,07	145	2,5
10	200	0,07	184	2,5

Величина, знак та розподіл залишкових напружень у поверхневому шарі від різного поєднання режимних параметрів показано на рис. 3.5. – 3.7.

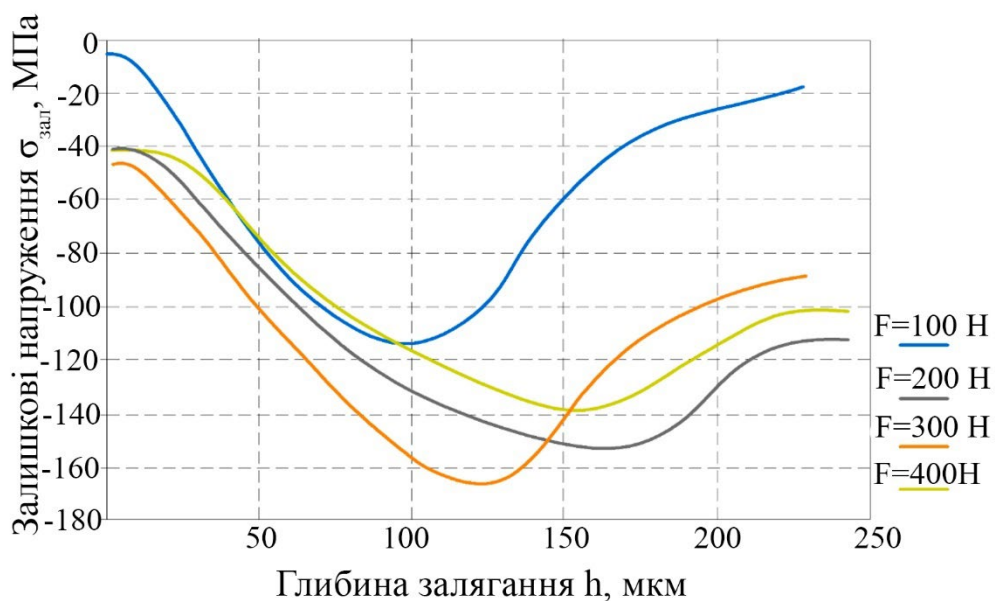


Рис. 3.5. Вплив зусилля вигладжування на розподіл залишкових напружень

Встановлено, що найбільший вплив на розподіл залишкових напружень має зусилля вигладжування. Так, із його зміною (рис. 3.5) зі 100 Н до 300 Н величина залишкових напружень на поверхні та за глибиною збільшується. Подальше підвищення зусилля вигладжування не призводить до зміни залишкових напружень на поверхні, але викликає зменшення їх за глибиною залягання із 162 МПа до 138 МПа.

Зміна подачі вигладжування в межах варіювання від 0,05 мм/об до 0,12 мм/об (рис. 3.6) не викликало значної зміни в формуванні величини залишкових напружень на поверхні. Найбільшого значення вони досягали при подачі вигладжування 0,07 мм/об, їх величина склала 168 МПа. Вигладжування з подачею 0,05 мм/об призводило до розміцнення поверхневого шару та зменшення величини залишкових напружень.

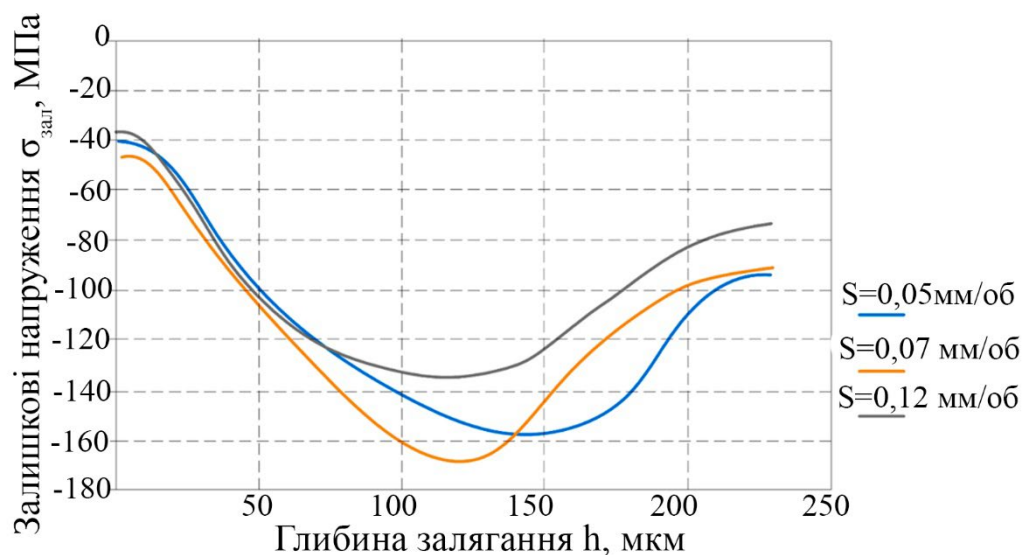


Рис. 3.6. Вплив подачі вигладжування на розподіл залишкових напружень

Найменший вплив на розподіл залишкових напружень має швидкість вигладжування (рис. 3.7.).

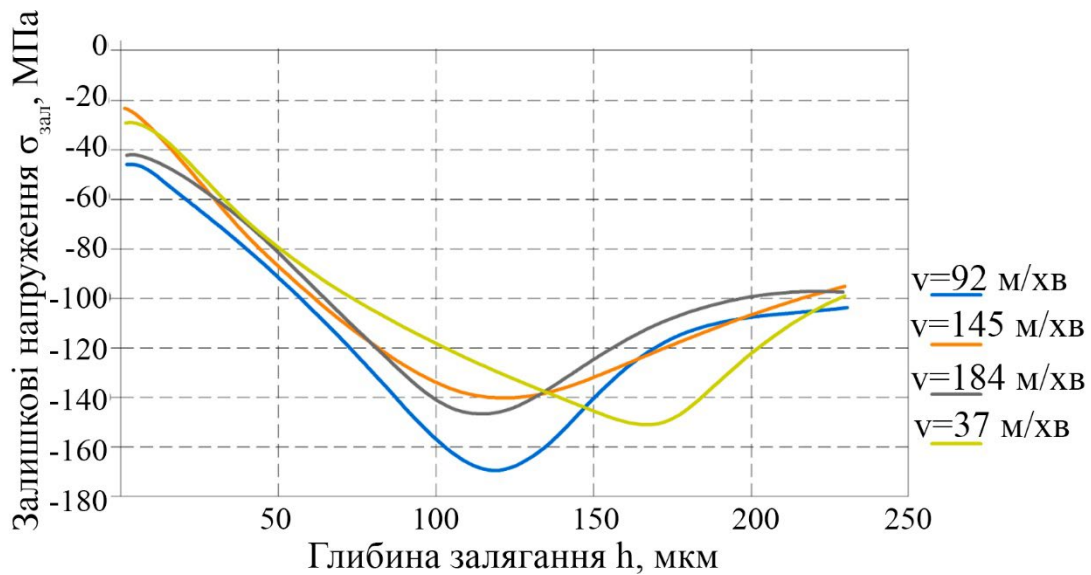


Рис. 3.7. Вплив швидкості вигладжування на розподіл залишкових напружень

При зміні швидкості з 37 м/хв до 184 м/хв напруження майже не змінилися, а за глибиною зміна відбулася в межах 18%.

Встановлено, що в межах всіх інтервалів варіювання режимних параметрів алмазного вигладжування отримані стискаючі залишкові напруження. Основний вплив на розподіл залишкових напружень має зусилля вигладжування. Найбільші за значенням стискаючі напруження 170 МПа можна отримати при вигладжуванні з зусиллям 300 Н, подачею 0,07 мм/об, швидкістю вигладжування 92 м/хв.

3.2. Алмазне вигладжування конструктивного концентратора напружень типу «Поверхня поєднання двох діаметрів»

В літературних джерелах міститься велика кількість інформації щодо рекомендацій за вибором режимних параметрів зміцнення, але як правило вони носять приватний характер, стосуються класичних циліндричних поверхонь та не враховують геометрію конструктивних концентраторів напружень.

Одним із розповсюджених конструктивних концентраторів напружень є перехід у формі радіусу між двома діаметрами «Поверхня поєднання двох

діаметрів». Наявність цього концентратора напружень в деталі значно знижує її якість і міцність та стає причиною утворення втомної тріщини, яка призводить до руйнування деталі. Особливістю втомного руйнування поверхні з'єднання типу «Поверхня поєднання двох діаметрів» є те, що тріщина з'являється на її початку (рис. 3.8.). Можна припустити, що для зменшення чутливості даної поверхні до концентрації напружень достатньо піддавати зміцненню тільки її частину.

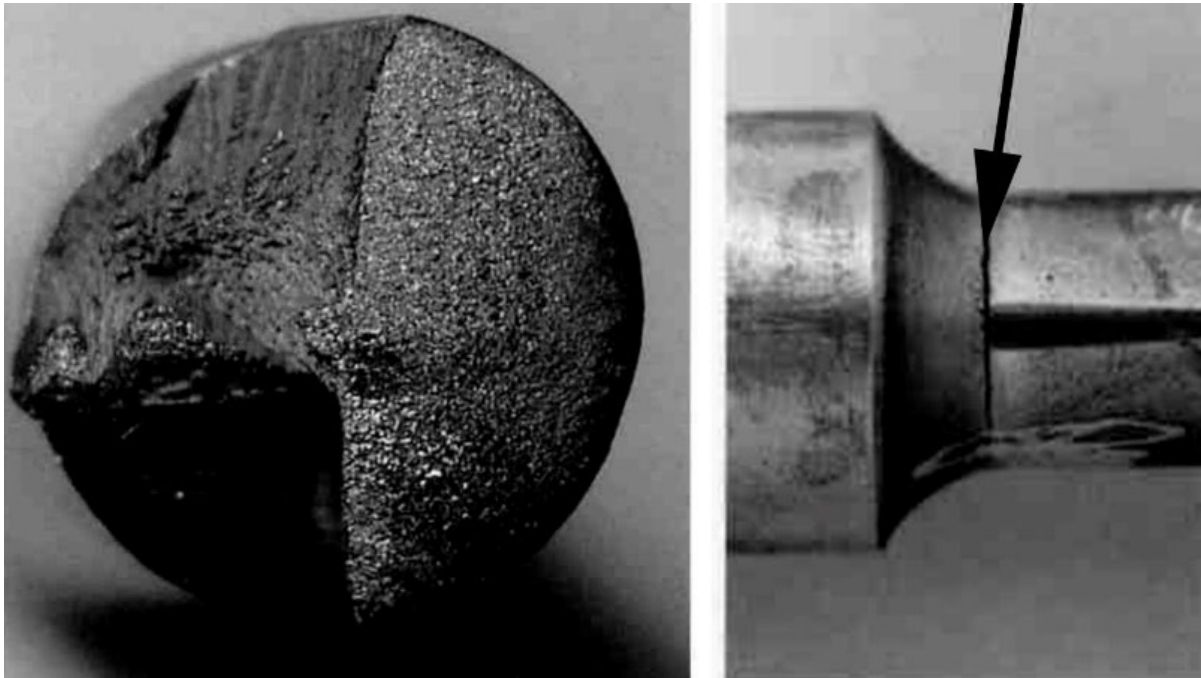


Рис. 3.8. Втомна тріщина у конструктивному концентраторі напружень типу «Поверхня поєднання двох діаметрів»

Виконано дослідження закономірностей зміни опору втомі від раціонального режиму алмазного вигладжування конструктивних концентраторів напружень типу «поверхня поєднання двох діаметрів». Для обробки використовували алмазний вигладжувач $R_{sf}=2.5\text{мм}$. Режимні параметри та результати вимірювання шорсткості та ступені деформаційного зміцнення показані в табл. 3.8.

Таблиця 3.8

Режимні параметри алмазного вигладжування та результати вимірювання шорсткості та степені деформаційного зміцнення

№ з/п	F, Н	S, мм/об	V, м/хв	Ra, мкм	S _{Нм} , %
1	100	0,07	92	0,86	3,5
2	200	0,07	92	0,45	22
3	300	0,07	92	0,32	28

Раціональні значення шорсткості та ступені деформаційного зміцнення отримані при вигладжуванні з зусиллям 300 Н, подачею 0,07 мм/об, швидкістю вигладжування 92 м/хв.

Досліджено закономірність зміни опору втомі зразка з конструктивним концентратором напружень типу «Поверхня поєднання двох діаметрів» від розміру концентратора (рис. 3.9) та раціонального режиму алмазного вигладжування (рис. 3.10).

Для досліджень виготовлено чотири партії циліндричних зразків. Три партії з радіусами «Поверхні поєднання двох діаметрів» 1мм, 2,5мм, 4мм, четверта партія зразків була зміцнена алмазним вигладжування за попередньо встановленим раціональним режимом обробки (табл. 3.9).

Таблиця 3.9

Параметри зразків для визначення опору втомі

№ з/п	Радіус галтелі R, мм	Вид обробки поверхні	Опір втомі σ_{-1} , МПа
1	1	Без зміцнення	360
2	2.5	Без зміцнення	380
3	4	Без зміцнення	410
5	4	Алмазне вигладжування	530

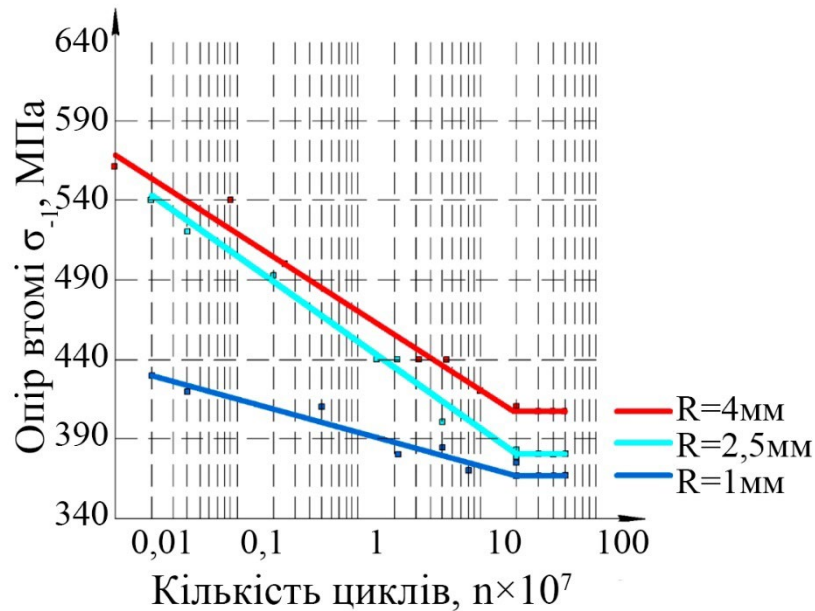


Рис. 3.9. Криві втоми при різній величині радіусу «Поверхні поєднання двох діаметрів»

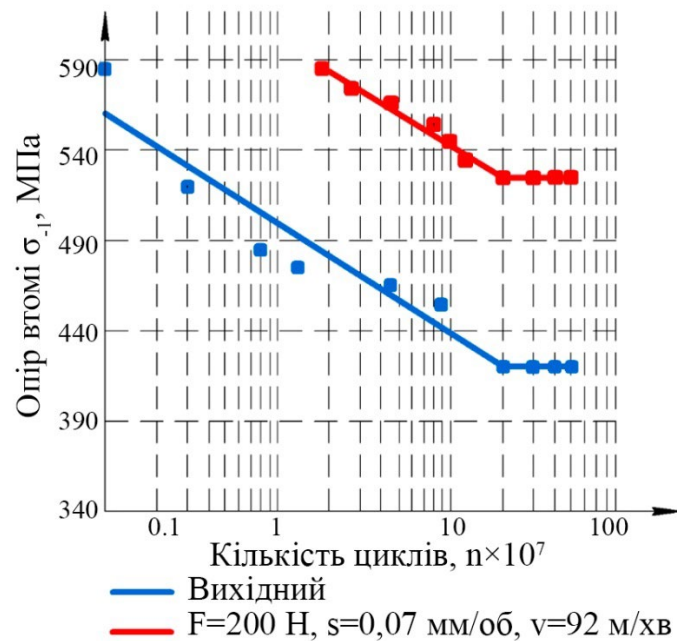


Рис. 3.10. Криві втоми у вихідних зразках та після зміцнення

Дослідження показали, що зі збільшенням величини радіусу «Поверхні поєднання двох діаметрів» межа опору втоми підвищується. Так, при радіусі 1мм межа опору втоми склала 360 МПа, а при радіусі 4мм межа опору вже становила 410 МПа. Тому важливо при проектуванні нових деталей, намагатися у якості

поверхні з'єднання двох діаметрів або діаметру та площини, обирати поверхню у формі «Поверхні поєднання двох діаметрів» якомога більшого радіусу та для підвищення міцності використовувати алмазне вигладжування, при зміцненні яким опір втомі зразка склав 530 МПа (рис. 3.10.).

Для оцінки характеру руйнування та визначення місця зародження втомної тріщини було виконано дослідження втомних зламів та мікроструктури зразків після шліфування та обробки алмазним вигладжуванням. Візуальне вивчення втомних зламів показало наявність декількох зон (рис. 3.11.) зламу.

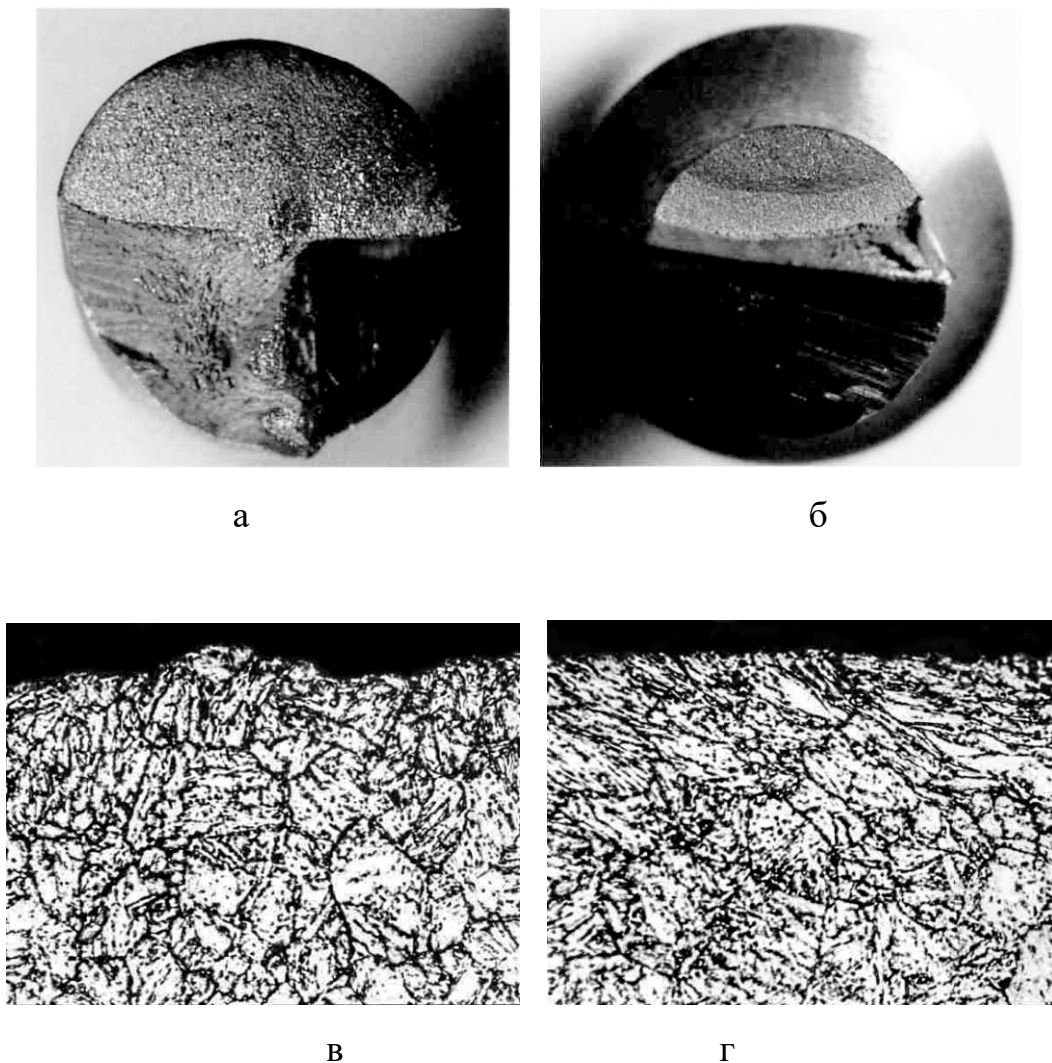


Рис. 3.11. Фрактографія втомних зламів та мікроструктура зразків після шліфування (а, в) та АВ (б, г)

Фрактографія втомного зламу зразка після шліфування (рис 3.11. а) показує наявність ознак крихкого руйнування. Після появи втомної тріщини відбулось швидке її розповсюдження та руйнація зразка. Фрактографія зразка після алмазного вигладжування (рис 3.11. б) показує втомний характер зламу. Чітко видно декілька зон руйнування в залежності від проходження крізь них втомної тріщини. Початкова зона втомного руйнування розташована під поверхнею на глибині 0,2 мм, що трапилось внаслідок наявності зміцненого поверхневого шару. При дослідженні на опір втомі цього зразка не відбулося його швидкого руйнування, а про появу втомної тріщини говорило тільки падіння частоти коливань вібростенду.

Аналіз мікроструктури (рис. 3.11. в, г) підтверджує наявність значного впливу алмазного вигладжування на поверхневий шар деталі. Мають місце чітко зорієнтовані зерна поверхневого шару у напрямку дії зусилля вигладжування та подачі, які будуть чинити опір появі та розповсюдженню втомної тріщини. Данні мікроструктури та фрактографії зломів показують, що наявність зміцненого поверхневого шару уповільнює розповсюдження втомної тріщини.

Встановлено, що використання алмазного вигладжування з раціональним поєднанням режимних параметрів, дозволило досягти підвищення характеристик якості поверхневого шару та підвищити межу опору втомі деталі з конструктивним концентратором напружень типу «Поверхня поєднання двох діаметрів».

3.3. Алмазне вигладжування конструктивного концентратора напружень типу «Поверхня переходу отвору у площину»

Виконано дослідження характеру та величини впливу режимних параметрів алмазного вигладжування на параметри якості зразків з отвором, в яких замість гострої кромки сформована «Поверхня переходу отвору у площину».

В якості режимних параметрів алмазного вигладжування обрано: зусилля, подачу, швидкість та вигладжування за два проходи з різними режимами. Для

оцінки якості обрані параметри: шорсткість R_a , ступінь деформаційного зміцнення $S_{H\mu}$. В якості цільової функції обрано параметр опір втомі.

Для вигладжування «Поверхня переходу отвору у площину» використовували вигладжувач з радіусом сфери алмазу 0,5мм. В результаті в точці контакту вигладжувача з поверхнею зміцнення виник значно більший контактний тиск аніж при використанні вигладжувача радіусом 2,5 мм. Тому режимні параметри алмазного вигладжування були зменшені порівняно з тими, що були визначені раніше.

Було виготовлено чотири партії зразків, у яких на отворах були сформовані «Поверхні переходу отвору у площину», та виконано зміцнення АВ з різними режимними параметрами. Режимні параметри алмазного вигладжування та результати вимірювання шорсткості та ступені деформаційного зміцнення показано в таблиці 3.10.

Таблиця 3.10

Параметри зразків та режимні параметри зміцнення

№ з/п	Геометрія кромки	Кількість проходів	F, Н	S, мм/об	v, м/хв	R_a , мкм	$S_{H\mu}$ %
1	R=1,5мм	Ручне полірування – фаска				0,65	-
2	R=1,5мм	1	30	0,05	4.71	0,3	20
3	R=1,5мм	2	60	0,05	4.71	0,2	25
			30	0,03	6.28		
4	R=1,5мм	2	120	0,05	4.71	0,34	5
			60	0,03	6.28		

Дослідження шорсткості та ступені деформаційного зміцнення (табл. 3.10) показало, що застосування алмазного вигладжування за два проходи не дає значного покращення шорсткості та ступені деформаційного зміцнення, але займає набагато більше часу, тому його застосування не раціонально.

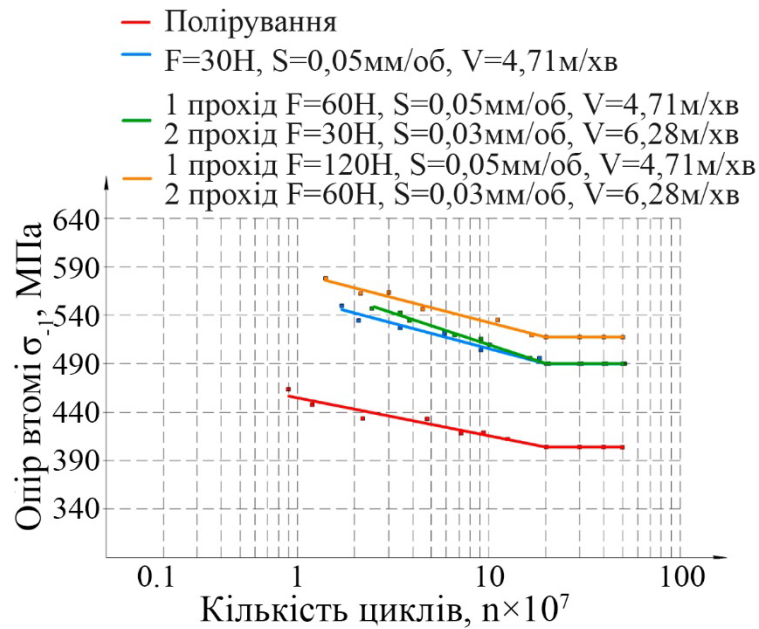


Рис. 3.12. Криві втомі зразків з отвором, в якому замість гострої кромки сформована «Поверхня переходу отвору у площину», при різних параметрах обробки алмазним вигладжуванням

Аналіз кривих втомі (рис. 3.12.) показало, що застосування АВ значно підвищує опір втомі зразка з отвором. Для зразка без зміцнення він склав 400 МПа, а використання алмазного вигладжування дозволило його підвищити на 30% до $\sigma_1=520$ МПа. Результати дослідження опору втомі підтвердили дані, отримані при визначенні шорсткості та величини деформаційного зміцнення. Для зміцнення «Поверхні переходу отвору у площину» раціонально використовувати вигладжування з наступними режимними параметрами: зусиллям 30 Н, подачею 0,05 мм/об, швидкістю вигладжування 4,71 м/хв [108].

На рис. 3.13. зображено злам вихідного зразка, поверхня з'єднання отвору та площини якого сформована за стандартною технологією у формі фаски. Осередок руйнування знаходиться на поверхні зразка. Злам відноситься до всереденізереного крихкого типу, має фасеточну будову. Всереденізеренні фасетки утворилися в результаті руйнування всередині зерен, площа їх помітно менше розмірів зерен.

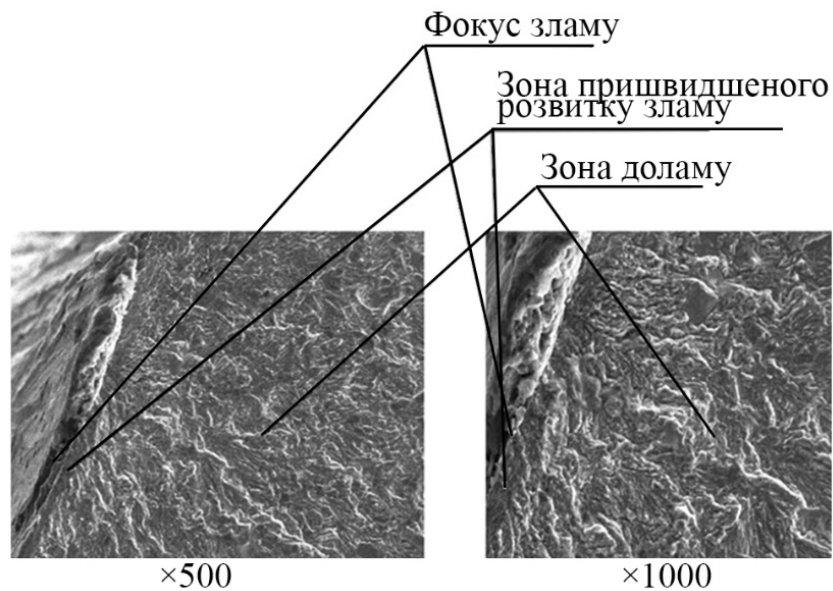


Рис. 3.13. Втомний злам вихідного зразка

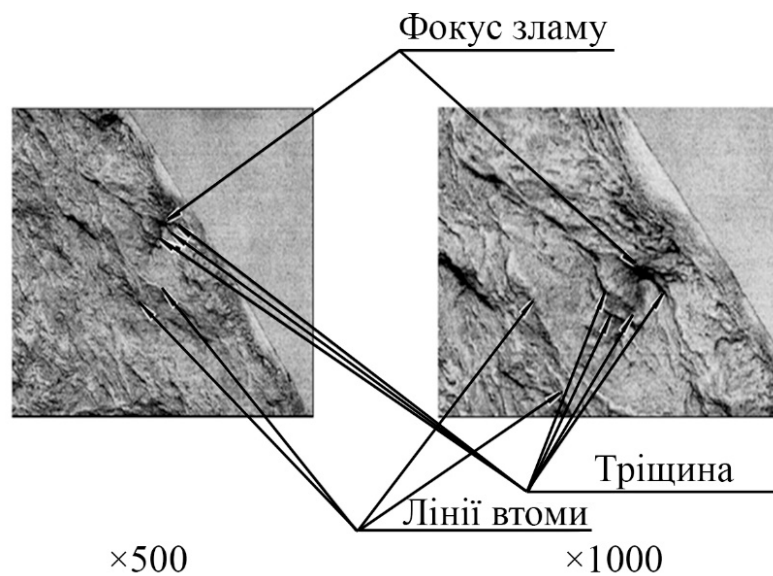


Рис. 3.14. Втомний злам зразка зміцненого алмазним вигладжуванням

На рис.3.14. зображений злам зразка після алмазного вигладжування. На рисунку чітко можна бачити ущільнений поверхневий шар. Втомна тріщина виникла під поверхнею зразка на глибині 0,1 мм, її форма та напрямок говорить про опір поверхневого шару її розповсюдженню та збільшенню.

Мікроструктура поверхневого шару зразка на рис. 3.15. є сорбітом з виділеннями дисперсних частинок карбідів по межах початкових мартенситних голок.

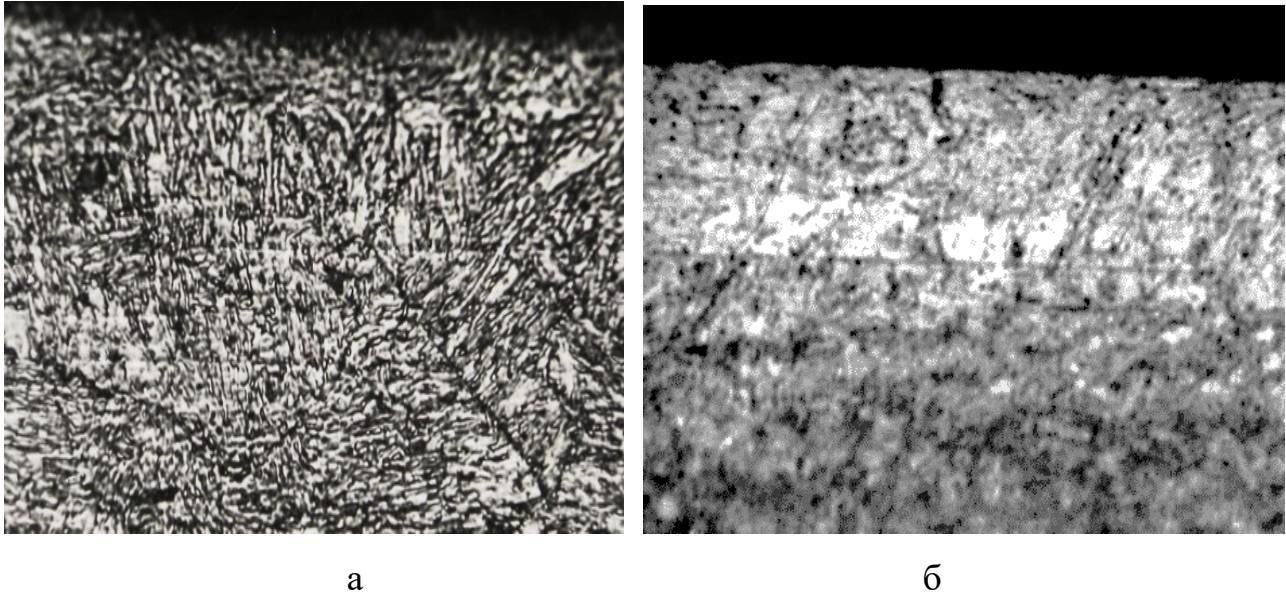


Рис. 3.15. Мікроструктура зразка після обробки: а - шліфування; б - алмазне вигладжування ($\times 800$).

У зразку після алмазного вигладжування в поверхневому шарі виявлені лінії ковзання в зернах з переважною орієнтацією відносно зовнішніх діючих сил (рис. 3.15. б). Формування та орієнтація цих ліній показує як відбувався механізм пластичного деформування при алмазному вигладжуванні. Ці данні слід використовувати при призначенні схем вигладжування для конструктивних концентраторів напружень. При нехтуванні цими даними можна отримати результат зворотній зміцненню.

Проведенні дослідження підтверджують ефективність використання алмазного вигладжування для зміцнення конструктивного концентратора напружень типу «Поверхня переходу отвору у площину». Раціональне поєднання режимних параметрів алмазного вигладжування дозволяє покращити шорсткість

поверхні на 46%, досягти значного ступеню наклепу у 37% та підвищити опір втомі на 30% в зразках, виготовлених з жароміцного сплаву ЭП609-Ш.

3.4. Висновки

Комплексні дослідження впливу алмазного вигладжування на параметри якості поверхневого шару конструктивних концентраторів напружень деталей ГТД літальних апаратів та їх статистична обробка дозволила сформуванати наступні висновки.

Дослідження впливу алмазного вигладжування на формування шорсткості поверхневого шару конструктивних концентраторів напружень деталей ГТД, виконаних із жароміцного сплаву ЭП609-Ш, дозволило встановити раціональне поєднання режимних параметрів, при яких шорсткість буде мінімальною: зусилля вигладжування $F=306$ Н; подача вигладжування $S=0.04$ мм/об; швидкість вигладжування $n=115$ м/хв.

Дослідження дозволили встановити, що найбільший вплив з режимних параметрів алмазного вигладжування на ступінь деформаційного зміцнення поверхневого шару конструктивних концентраторів напружень деталей, виконаних із жароміцної сталі ЭП609-Ш, має зусилля вигладжування. При зусиллі вигладжування 400 Н ступінь наклепу склала 37%.

Встановлено, що в межах всіх інтервалів варіювання режимних параметрів алмазного вигладжування отримані стискаючі залишкові напруження. Основний вплив на розподіл залишкових напружень має зусилля та подача вигладжування. Найбільші за значенням стискаючі напруження можна отримати при вигладжуванні з зусиллям 300 Н, подачею 0,07 мм/об, швидкістю вигладжування 92 м/хв.

Дослідження впливу на опір втомі зразків конструктивних концентраторів напружень типу «Поверхня поєднання двох діаметрів» дозволило встановити, що при збільшенні величини радіусу поверхні поєднання межа опору втомі

підвищується. Так при радіусі 1мм межа опору втомі склала 360 МПа, а при радіусі 4мм межа вже становила 410 МПа. Застосування алмазного вигладжування з зусиллям 200 Н, подачею 0,07 мм/об, швидкістю вигладжування 92 м/хв дозволило підвищити опір втомі до 530 МПа.

Встановлено, що застосування алмазного вигладжування для зміцнення «Поверхні переходу отвору у площину» підвищує опір втомі з 400 МПа для вихідного зразка до 520 МПа при вигладжуванні зусиллям 30 Н, подачею 0,05 мм/об, швидкістю вигладжування 4,71 м/хв [108].

Дослідження зламів зразків з «Поверхнею поєднання двох діаметрів» та «Поверхнею переходу отвору у площину» дозволило встановити втомний характер їх руйнування, наявність значного зміцненого поверхневого шару та ліній ковзання в зернах з переважною орієнтацією відносно зовнішніх діючих сил, що буде використано при призначенні технологічних рекомендацій по застосуванню алмазного вигладжування для підвищення якості конструктивних концентраторів напружень.

Матеріали розділу опубліковані в наступних роботах: [106], [107], [108].

РОЗДІЛ 4

ЗМІЦНЕННЯ АЛМАЗНИМ ВИГЛАДЖУВАННЯМ ДЕТАЛЕЙ, ОТРИМАНИХ СЕЛЕКТИВНИМ ЛАЗЕРНИМ СПІКАННЯМ

4.1. Алмазне вигладжування деталей зі сплаву на основі алюмінідів титану OX45-3ODS

4.1.1. Ефективність зміцнення алмазним вигладжуванням сплаву на основі алюмінідів титану OX45-3ODS

Для підвищення якості деталей, виготовлених зі сплаву на основі алюмініду титану OX45-3ODS (Ti - 45Al-3Nb - Y₂O₃), виконано дослідження особливостей локальної поверхнево-пластичної деформації алмазним вигладжуванням зразків із зазначеного сплаву, синтезованих лазерним спіканням. Дослідження виконували на плоских зразках зі сплаву OX45-3ODS, отриманого шляхом селективного лазерного спікання [109]. Хімічний склад досліджуваного матеріалу показано у табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Хімічний склад досліджуваних матеріалів

Матеріал зразка	Елементний склад (масова доля), %						Домішки
	Ti	Al	Fe	Nb	Y	Mg	
OX45-3ODS	62,5	27,94	0,11	8,43	0,6	0,42	-

Досліджуваний сплав OX45-3ODS має низьку щільність одночасно з високою теплостійкістю і високими механічними властивостями. Матеріал є сплавом на основі алюмініду титану, зміцнений дисперсними оксидними частками ітрію з метою зменшення залишкового порового простору, підвищення жароміцності, низькотемпературної пластичності та уповільнення дифузійних процесів на межах зерен при робочій температурі деталі.

Мікроструктура поверхневого шару зразку показана на рис. 4.1. Залишкова пористість зразків отриманих СЛС зі сплаву OX45-3ODS на рівні 17...22%.

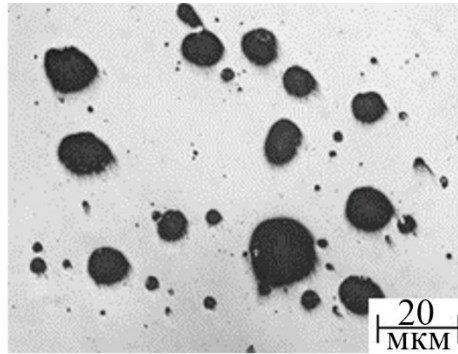


Рис. 4.1. Мікроструктура зразків із сплаву OX45-3ODS

Топографія поверхонь зразків до обробки алмазним вигладжуванням показана на рис. 4.2.

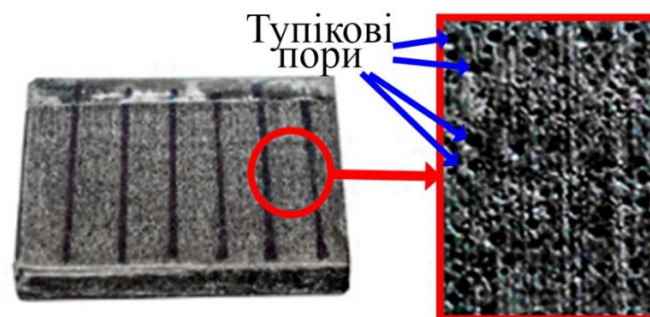


Рис. 4.2. Топографія поверхонь зразка із сплаву OX45-3ODS (x50)

На поверхні зразків (рис. 4.2.) наявні поверхневі тупикові пори, які виступають додатковими технологічними концентраторами напружень та значно погіршують характеристики якості деталі [111].

Визначимо ефективність застосування алмазного вигладжування для зміцнення кількості пор у поверхневому шарі для підвищення його характеристик якості.

Діапазон режимних параметрів було обрано виходячи із попередніх досліджень для жароміцного сплаву ЕП609-Ш. Вигладжували ділянки шириною

2...3 мм, розташовані на поверхні плоского зразка. Режимні параметри алмазного вигладжування наведені в табл. 4.2.

Таблиця 4.2

Режимні параметри зміцнення досліджуваних матеріалів

№ з/п	Зусилля F, кН	Подача S, мм/об	Радіус сфери R_{sf} , мм
1	0,1	0,1	0,5
2	0,2	0,1	0,5
3	0,3	0,1	0,5
4	0,4	0,1	0,5

Топографія поверхонь зразків після обробки алмазним вигладжуванням показана на рис. 4.4.



а (x50)



б (x50)



в (x50)



г (x50)

Рис. 4.4. Топографія поверхні зразка зі сплаву ОХ45-3ОДС після вигладжування з різними зусиллями: а – режим №1; б – режим №2; в – режим №3; г – режим №4

Аналіз поверхонь (рис. 4.4.) зразка, отриманого селективним лазерним спіканням OX45-3ODS, показує, що режимні параметри алмазного вигладжування призводять до значного зниження пористості поверхневого шару. Глибина зміцненого шару буде визначатися поєднанням режимних параметрів процесу, фізичними та механічними характеристиками оброблюваного матеріалу, а також параметрами порового простору поверхневого шару. На топографію поверхні зразка зі сплаву на основі алюмініду титана найбільший вплив мало зусилля вигладжування. При значному збільшенні зусилля до 0,4кН відбувалося погіршення якості поверхні та її руйнування (рис. 4.4. в). Виникли задирки та відбулося розтріскування поверхні зразка. Це можна пояснити сукупним впливом декількох факторів: малою пластичністю оброблюваного матеріалу; невеликим радіусом сфери вигладжувача; завеликим зусиллям вигладжування. Використання вигладжувача малого радіусу при значному зусиллі вигладжування призвело до виникнення великого питомого тиску у точці контакту інструменту з поверхнею зразка, що в свою чергу призвело до виникнення мікрорізання та руйнування поверхні обробки замість пластичного деформування та зміцнення.

Мікрофотографії поперечного перерізу зразків зі сплаву на основі алюмініду титану (рис. 4.5.а) показують наявність великої кількості пор у поверхневому шарі зразка.

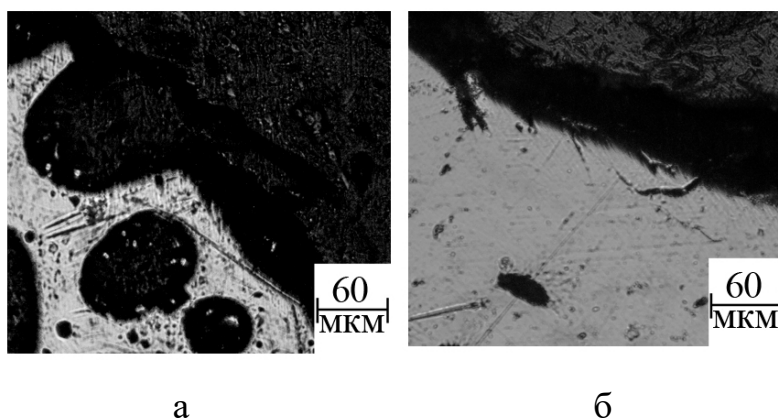


Рис. 4.5. Вплив АВ на зміцнення поверхневого шару зразка з OX45-3ODS: а – вихідний зразок; б – мікрофотографія зразка після АВ за режимом №3

Застосування алмазного вигладжування значно знижує пористість на поверхні зразку та призводить до закриття тупикових пор (рис. 4.5. б).

Встановлено, що алмазне вигладжування може бути ефективно застосовано для ущільнення та зміцнення поверхневого шару виробів з малопластичних порошкових матеріалів.

Оцінка результатів, отриманих при зміцненні АВ з різними режимами поверхні зразків показує, що пошук оптимального поєднання режимних параметрів зміцнення та геометрії вигладжувача для порошкових матеріалів, отриманих методами селективного лазерного спікання, є актуальною задачею при виробництві деталей ГТД літальних апаратів.

Її розв'язання дозволить розширити номенклатуру виробів, що виготовляються з використанням селективного лазерного спікання. Застосування алмазного вигладжування є перспективною технологією для розширення сфери застосування селективного лазерного спікання для виготовлення деталей у авіаційно-космічних галузях машинобудування.

4.1.2. Формування якості поверхневого шару деталі зі сплаву на основі алюмінідів титану OX45-3ODS

Для ефективного застосування алмазного вигладжування з метою зниження чутливості до концентрації напружень деталі зі сплаву на основі алюмінідів титану OX45-3ODS, синтезованого з порошку шляхом селективного лазерного спікання, необхідно встановити закономірності впливу режимних параметрів даної технології на формування якості поверхневого шару.

Для цього виконано оцінку впливу режимних параметрів алмазного вигладжування на якість поверхні зразків зі сплаву OX45-3ODS, синтезованого з порошку шляхом селективного лазерного спікання. Для досягнення поставленої мети розв'язувались задачі, пов'язані з розробкою та реалізацією плану

експерименту по дослідженню впливу режимних параметрів алмазного вигладжування на якість поверхні, встановлення залежності шорсткості поверхні від режимів та умов вигладжування, а також аналізу встановлених закономірностей з метою встановлення раціональних режимних параметрів обробки [112]. При виборі режимних параметрів керувалися, за відсутністю даних для порошкових матеріалів, даними, отриманими раніше для жароміцного сплаву ЭП609-Ш, який за складністю обробки та механічними властивостями схожий з даним матеріалом.

Режимні параметри алмазного вигладжування показані в табл. 4.3

Таблиця 4.3

Режимні параметри зміцнення зразків із сплаву OX45-3ODS

№ з/п	Зусилля F, кН	Подача S, мм/об	Радіус сфери R _{SF} , мм	№ з/п	Зусилля F, кН	Подача S, мм/об	Радіус сфери R _{SF} , мм
1	0,1	0,05	1,0	15	0,3	0,10	4,0
2	0,1	0,05	2,5	16	0,3	0,15	1,0
3	0,1	0,05	4,0	17	0,3	0,15	2,5
4	0,1	0,10	1,0	18	0,3	0,15	4,0
5	0,1	0,10	2,5	19	0,4	0,05	1,0
6	0,1	0,10	4,0	20	0,4	0,05	2,5
7	0,1	0,15	1,0	21	0,4	0,05	4,0
8	0,1	0,15	2,5	22	0,4	0,10	1,0
9	0,1	0,15	4,0	23	0,4	0,10	2,5
10	0,3	0,05	1,0	24	0,4	0,10	4,0
11	0,3	0,05	2,5	25	0,4	0,15	1,0
12	0,3	0,05	4,0	26	0,4	0,15	2,5
13	0,3	0,10	1,0	27	0,4	0,15	4,0
14	0,3	0,10	2,5				

Структура сплаву OX45-3ODS являє собою порошковий матеріал, середня

величина залишкової пористості після селективного лазерного спікання порошку складала 22% (рис. 4.6.). На поверхні зразків наявна велика кількість відкритих, тупикових пор, середня величина котрих досягала 0,25 мм.

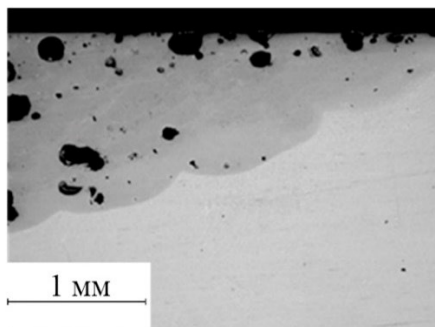
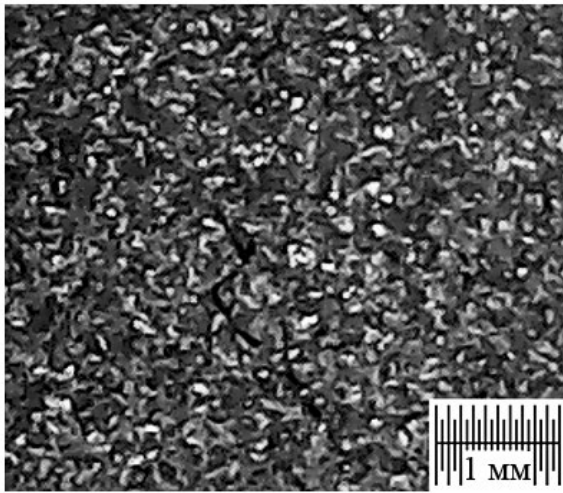
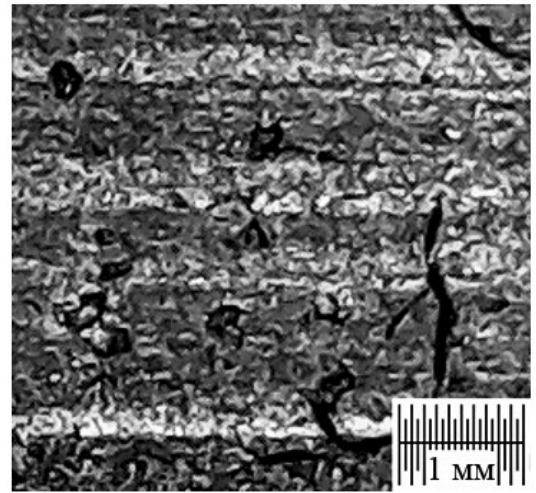


Рис. 4.6. Структура перехідної зони з матеріалом підложки вихідних зразків, отриманих за технологією СЛС [102]

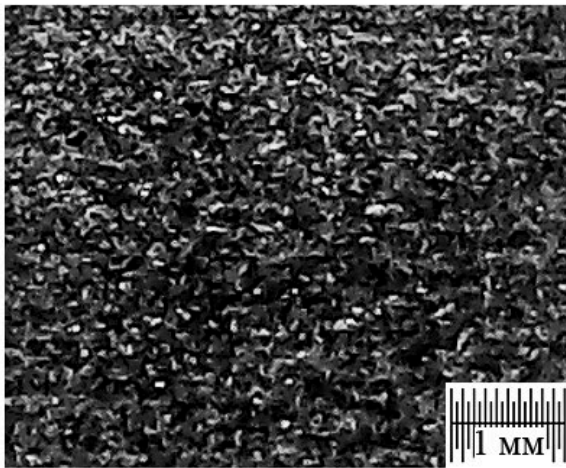
На рисунку 4.7. показана топографія поверхонь зразка зі сплаву ОХ45-3ОДС, зміцненого алмазним вигладжуванням з режимними параметрами, наведеними в табл. 4.3. Серед двадцяти семи режимів зміцнення топографія поверхонь показана для режимів зміцнення, які призвели до найменшої та найбільшої шорсткості. Аналіз мікрофотографій поверхонь (рис. 4.7.) показує, що використання алмазного вигладжувача радіусом 1,0 мм у поєднанні з зусиллям вигладжування 0,3 кН та подачею 0,05 мм/об призводить до значного погіршення якості поверхні (рис. 4.7.б). Найкращій результат з точки зору якості поверхні дає зміцнення з зусиллям 0,3кН, подачею 0,1 мм/об та вигладжувачем 2,5мм (рис. 4.7б). Збільшення радіусу зменшує тиск в точці контакту вигладжувача з поверхнею обробки та компенсує зниження шорсткості від збільшення подачі вигладжування внаслідок більшої величини перекриття між сусідніми проходами, що підвищує продуктивність обробки. Подальше збільшення подачі до 0,15 мм/об (рис. 4.7. д-е) через недостатнє перекриття між сусідніми проходами призводить до утворення регулярного мікрорельєфу, наявність котрого для деталей, на яких передбачається використання даної технології, небажано.



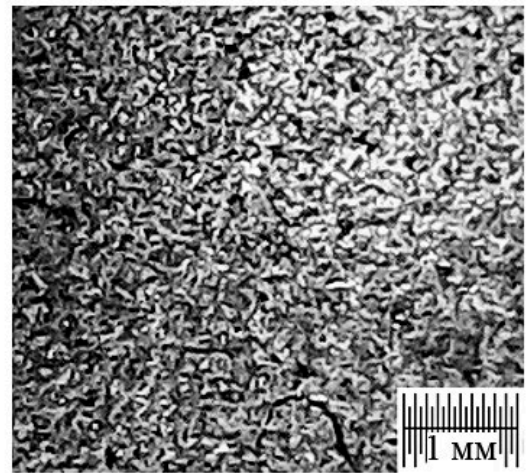
а



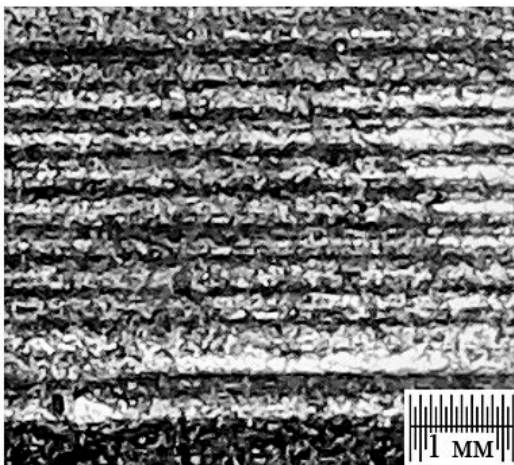
б



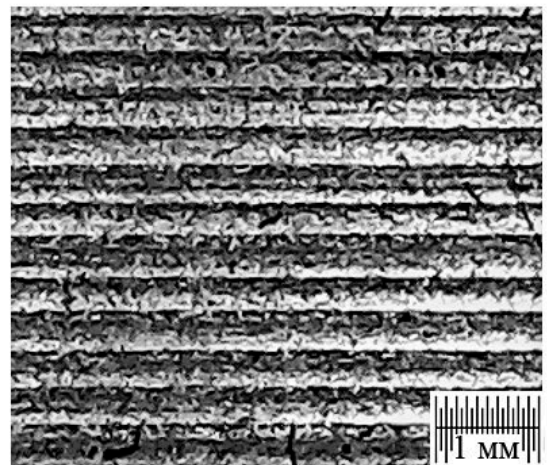
в



г



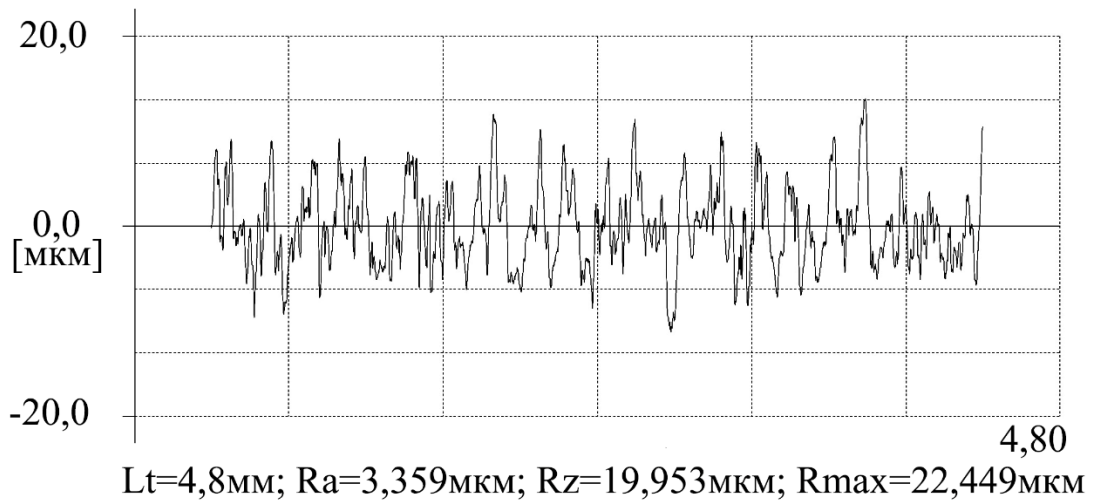
д



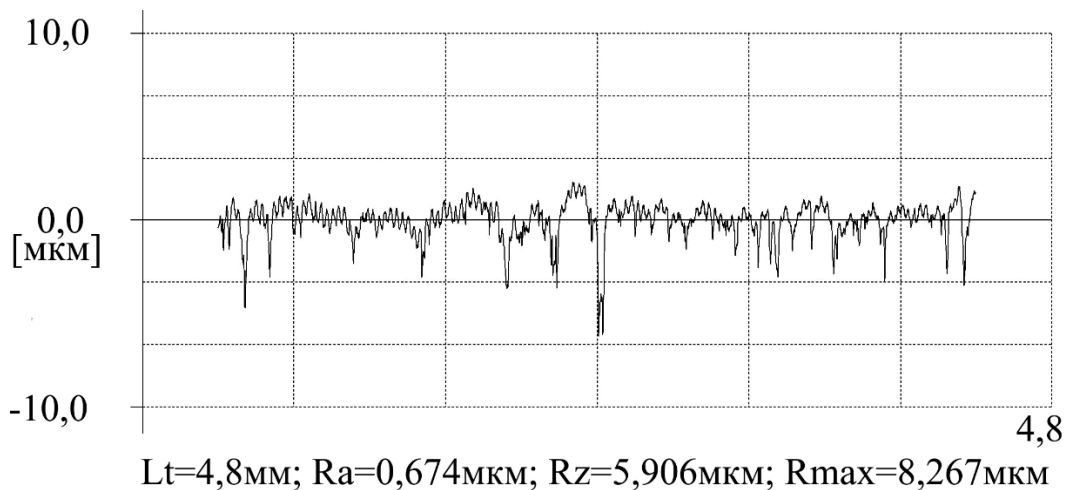
е

Рис. 4.7. Топографія зразків із сплаву OX45-3ODS зміцнених АВ: а – вихідний; б – режим № 10; в – режим № 14; г – режим № 15; д – режим №16; е – режим № 25

На рис. 4.8. показані профілограми поверхні вихідного зразка та зразка після алмазного вигладжування з режимними параметрами. Мінімальна шорсткість забезпечується при обробці з зусиллям 300 Н, подачею 0,1 мм/об та вигладжувачем 2,5мм (рис 4.8б). Інші профілограми показані у дод. В.



а



б

Рис. 4.8. Профілограми зразків зі сплаву OX45-3ODS: а – вихідний; б – зміцнений АВ, режим № 15;

Для побудови математичної моделі залежності шорсткості від різного поєднання режимних параметрів застосовано повний факторний аналіз за трьома варійованими чинниками (табл. 4.4).

Варіації рівнів чинників

Чинник	Зусилля F, кН			Подача S, мм/об			Радіус сфери вигладжувача, R _{sf} , мм		
	X1			X2			X3		
Рівень	-1	0	+1	-1	0	+1	-1	0	+1
Значення чинника	0,1	0,3	0,4	0,05	0,1	0,15	1,0	2,5	4,0

Число можливих комбінацій рівнів чинників $N=3^3=27$. Матриця планування та результати проведеного експерименту наведені в табл. 4.5.

Таблиця 4.5

Матриця планування та результати проведеного експерименту

№ з/п	X1	X2	X3	X4	Шорсткість Ra, мкм
	Зусилля F, кН	Подача S, мм/об	Радіус сфери вигладжувача R _{sf} , мм	Вихідна пористість Pr, %	
1	-1	-1	-1	0,246	1,10
2	-1	-1	0	0,1233	0,85
3	-1	-1	+1	0,1866	1,15
4	-1	0	-1	0,13	2,04
5	-1	0	0	0,1833	1,3
6	-1	0	+1	0,1666	1,4
7	-1	+1	-1	0,1	2,6
8	-1	+1	0	0,13	1,25
9	-1	+1	+1	0,11	1,07
10	0	-1	-1	0,1166	4,26
11	0	-1	0	0,152	1,27

Продовження таблиці 4.5

№ з/п	X1	X2	X3	X4	Шорсткість Ra, мкм
	Зусилля F, кН	Подача S, мм/об	Радіус сфери вигладжувача R _{sf} , мм	Вихідна пористість Pr, %	
12	0	-1	+1	0,1	1,103
13	0	0	-1	0,1	3,38
14	0	0	0	0,11	0,79
15	0	0	+1	0,16	0,67
16	0	+1	-1	0,13	3,87
17	0	+1	0	0,11	1,0
18	0	+1	+1	0,15	1,35
19	+1	-1	-1	0,1	2,99
20	+1	-1	0	0,15	1,47
21	+1	-1	+1	0,16	0,97
22	+1	0	-1	0,11	2,97
23	+1	0	0	0,13	0,68
24	+1	0	+1	0,1	1,0
25	+1	+1	-1	0,15	4,15
26	+1	+1	0	0,12	0,79
27	+1	+1	+1	0,18	0,704

Для компенсації впливу початкової пористості, розподіл якої носить випадковий порядок, використовували трендову модель 2-го порядку з урахуванням парної взаємодії чинників між собою (табл. 4.6). Значущість факторів визначалося за допомогою статистики Вальда; чинник вважався значущим, якщо р-рівень відповідної гіпотези становив менше 5%.

**Трендова модель впливу режимних параметрів алмазного
вигладжування на шорсткість**

<p>Модель: $Ra = a_0 + a_1 \cdot P + a_2 \cdot S + a_3 \cdot R_{sf} + a_4 \cdot P_r + a_5 \cdot P^2 + a_6 \cdot S^2 + a_7 \cdot R_{sf}^2 + a_8 \cdot P_r^2 + a_9 \cdot P \cdot S + a_{10} \cdot P \cdot R_{sf} + a_{11} \cdot P \cdot P_r + a_{12} \cdot S \cdot R_{sf} + a_{13} \cdot S \cdot P_r + a_{14} \cdot R_{sf} \cdot P_r + a_{15} \cdot P \cdot S \cdot R_{sf} + a_{16} \cdot P \cdot R_{sf} \cdot P_r$ Залежна змінна: Ra</p> <p>Рівень впевненості: 95,0% (альфа=0,050)</p>						
	Оцінка	Стандартна помилка	t-рівень df=10	p-рівень	Нижня границя довірчого інтервалу	Верхня границя довірчого інтервалу
a0	27,630	8,5964	3,21415	0,009267	8,476	46,7842
a1	-39,501	17,1445	-2,30404	0,043951	-77,702	-1,3012
a2	-128,615	38,6665	-3,32626	0,007666	-214,769	-42,4605
a3	-9,609	2,1849	-4,39818	0,001339	-14,478	-4,7412
a4	-144,513	66,8955	-2,16028	0,056083	-293,566	4,5392
a5	-15,221	6,9618	-2,18631	0,053670	-30,733	0,2912
a6	222,663	72,6683	3,06411	0,011960	60,748	384,5784
a7	0,377	0,0836	4,50387	0,001136	0,190	0,5628
a8	158,113	130,8512	1,20834	0,254713	-133,441	449,6679
a9	165,257	74,7533	2,21070	0,051500	-1,304	331,8177
a10	21,218	6,6637	3,18467	0,009742	6,373	36,0637
a11	250,645	84,2833	2,97384	0,013954	62,850	438,4394
a12	24,569	9,1895	2,67359	0,023348	4,093	45,0444
a13	235,743	82,6759	2,85141	0,017208	51,530	419,9565
a14	34,291	10,4137	3,29287	0,008111	11,088	57,4942
a15	-78,152	29,5149	-2,64787	0,024402	-143,915	-12,3884
a16	-104,843	29,0082	-3,61425	0,004735	-169,477	-40,2085

На основі даних обробки багатофакторного експерименту була отримана

регресійна модель, що описує сукупний вплив вихідної пористості, зусилля вигладжування, подачі, радіуса сфери алмаза на параметр шорсткості Ra .

$$Ra = 27,6 - 39,5 \cdot F - 128,6 \cdot S - 9,6 \cdot Rsf - 144,5 \cdot Pr - 15,2 \cdot F^2 + 222,7 \cdot S^2 + 0,4 \cdot Rsf^2 + 158,1 \cdot Pr^2 + 165,3 \cdot F \cdot S + 21,2 \cdot F \cdot Rsf + 250,7 \cdot F \cdot Pr + 24,69 \cdot S \cdot Rsf + 235,7 \cdot S \cdot Pr + 34,3 \cdot Pr \cdot Rsf - 78,1 \cdot F \cdot S \cdot Rsf - 104,8 \cdot F \cdot Pr \cdot Rsf$$

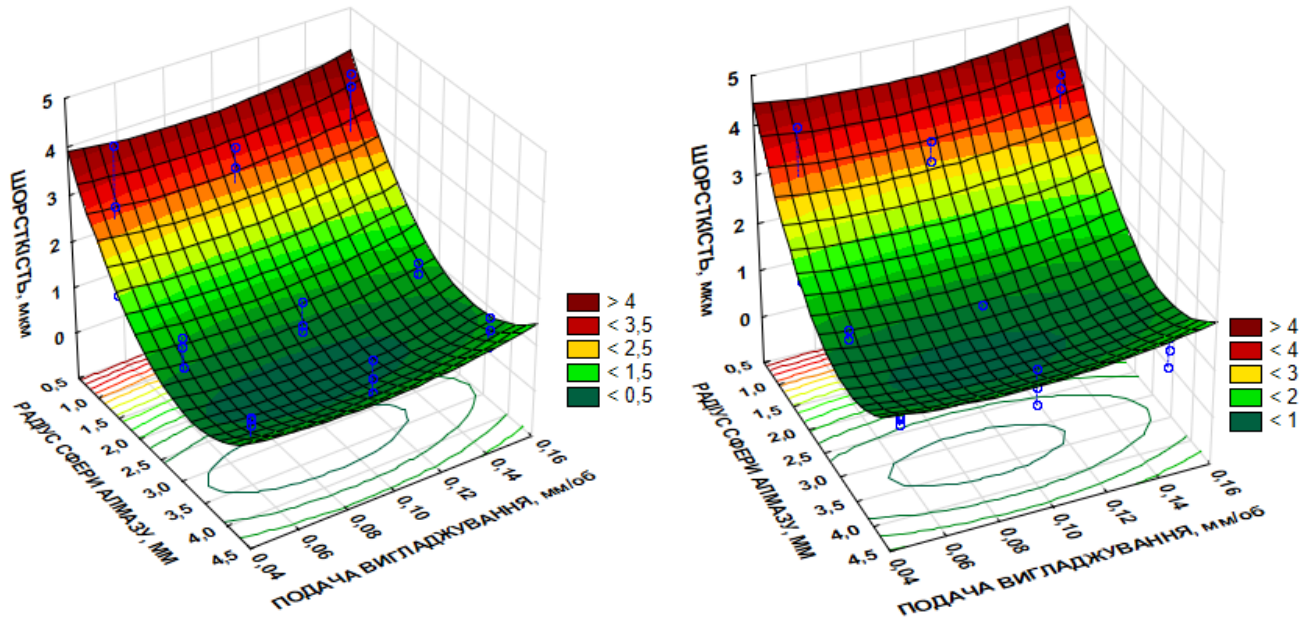
В результаті перевірки моделі після проведення 15 контрольних дослідів середня помилка цієї моделі склала близько 12%. Це пояснюється впливом вихідної пористості, розподіл якої носить випадкових характер.

За даними, отриманими при проведенні багатofакторного експерименту, побудовані залежності, які показують вплив на шорсткість умов вигладжування, подачі, радіусу сфери алмазного вигладжувача та вихідної пористості.

Закономірності впливу режимних параметрів вигладжування на шорсткість підпорядковуються поліноміальному закону розподілу. Найбільш точно поліноміальні поверхні апроксимують закономірності впливу на шорсткість: подачі вигладжування та радіусу сфери вигладжувача (рис. 4.9.). Поєднання цих факторів оказують найбільший вплив на шорсткість зміцненої поверхні.

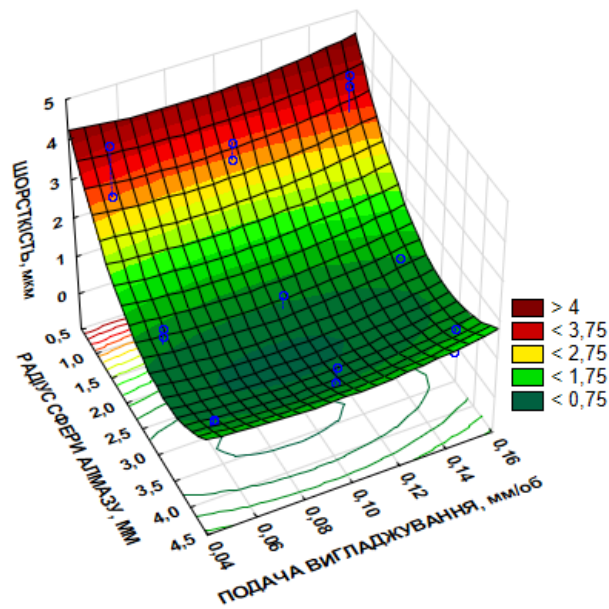
Встановлені закономірності показують, що для вигладжування пористих матеріалів необхідно застосовувати алмазні вигладжувачі з радіусом сфери алмазу більше 2,5 мм. Вигладжувач з меншим радіусом, попадаючи на тупикові пори, призводить до погіршення шорсткості поверхні внаслідок її розтріскування.

Застосування для обробки деталі вигладжувачів з радіусом сфери 4 мм недоцільно – це значно збільшує площу контакту вигладжувача з поверхнею обробки та для забезпечення одного й того ж питомого тиску необхідно прикладати значно більші зусилля, що в свою чергу також може призводити до розтріскування матеріалу.



а

б



в

Рис. 4.9. Залежності шорсткості поверхні зразків від параметрів АВ: а – $F=0,1$ кН;
б – $F=0,3$ кН; в – $F=0,4$ кН

Внаслідок того, що досліджуваний матеріал має високі характеристики

міцності, його вигладжування з силою менше 0,3 кН недоцільне, оскільки не призводить до достатнього ступеню деформування в точці контакту.

Дослідження впливу подачі на шорсткість показало, що оптимальною величиною подачі для вигладжування сплаву на основі алюмініду титану OX45-3ODS, отриманого шляхом селективного лазерного спікання, буде 0,1мм/об. Більша подача призводить до недостатнього ступеню перекриття канавок після вигладжування, менша, із-зі недостатньої пластичності матеріалу, – до руйнування уже зміцненої поверхні внаслідок проходу вигладжувача рядом з вигладженою поверхнею.

Оскільки всі досліджувані фактори оказують вплив на шорсткість поверхні, то найкращого її значення можна досягнути їх раціональним поєднанням [112].

4.1.3. Дослідження впливу алмазного вигладжування на формування ступені деформаційного зміцнення сплаву на основі алюмінідів титану OX45-3ODS

Як зазначалося раніше, при використанні ГТД літальних апаратів їх деталі піддаються впливу різних видів зносу. На зносостійкість деталей великий вплив має ступінь деформаційного зміцнення.

Для сплавів на основі алюмінідів титану, отриманих селективним лазерним спіканням, визначення впливу алмазного вигладжування на формування ступені деформаційного зміцнення у поверхневому шарі є актуальною задачею.

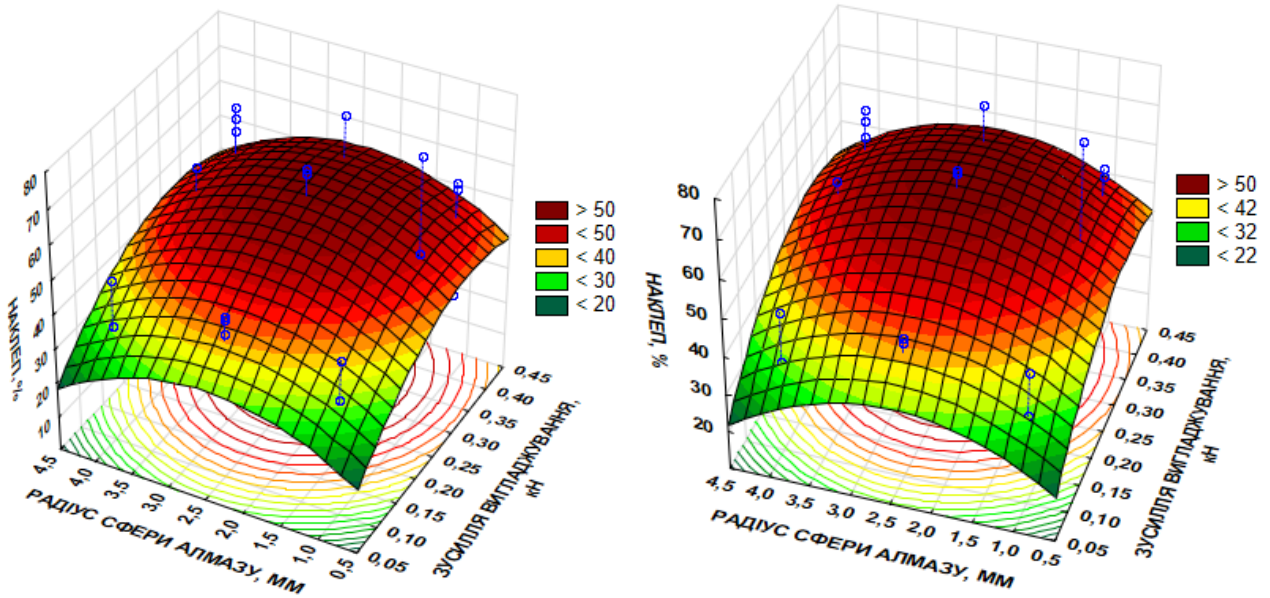
Виконано дослідження впливу алмазного вигладжування на формування ступеня деформаційного зміцнення поверхневого шару деталей зі сплаву на основі алюмінідів титану OX45-3ODS, отриманого селективним лазерним спіканням.

Режимні параметри алмазного вигладжування та досягнутий при їх поєднанні ступінь деформаційного зміцнення показані в табл. 4.7.

Режимні параметри зміцнення зразків зі сплаву OX45-3ODS

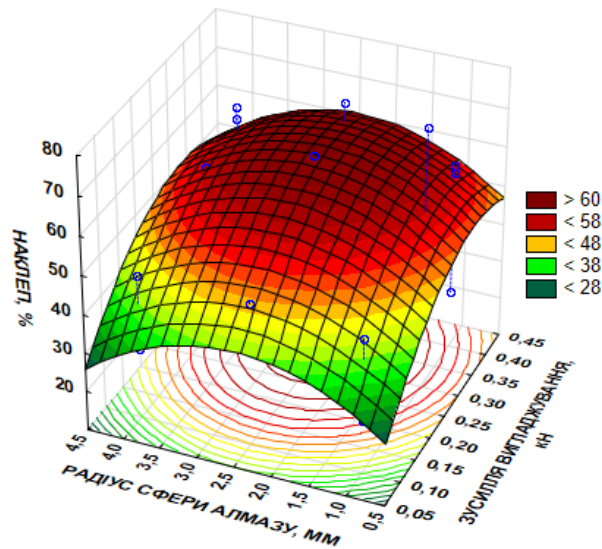
№ з/п	Зусилля F, кН	Подача S, мм/об	Радіус вигладж., R _{сф} , мм	Ступінь деф. зміц., S _{нм} , %	№	Зусилля F, кН	Подача S, мм/об	Радіус вигладж., R _{сф} , мм	Ступінь деф. зміц., S _{нм} , %
1	0,1	0,05	1,0	45	15	0,3	0,10	4,0	47
2	0,1	0,05	2,5	47	16	0,3	0,15	1,0	77
3	0,1	0,05	4,0	34	17	0,3	0,15	2,5	53
4	0,1	0,10	1,0	24	18	0,3	0,15	4,0	55
5	0,1	0,10	2,5	46	19	0,4	0,05	1,0	25
6	0,1	0,10	4,0	28	20	0,4	0,05	2,5	53
7	0,1	0,15	1,0	34	21	0,4	0,05	4,0	58
8	0,1	0,15	2,5	42	22	0,4	0,10	1,0	58
9	0,1	0,15	4,0	47	23	0,4	0,10	2,5	68
10	0,3	0,05	1,0	50	24	0,4	0,10	4,0	54
11	0,3	0,05	2,5	64	25	0,4	0,15	1,0	56
12	0,3	0,05	4,0	34	26	0,4	0,15	2,5	53
13	0,3	0,10	1,0	50	27	0,4	0,15	4,0	61
14	0,3	0,10	2,5	63					

За даними, отриманими при проведенні багатфакторного експерименту, побудовані залежності (рис. 4.10.), які показують вплив на ступінь деформаційного зміцнення різних режимних параметрів алмазного вигладжування: подачі, радіусу сфери алмазного вигладжувача та вихідної пористості.



а

б



в

Рис. 4.10. Залежності ступеня деформаційного зміцнення від режимних параметрів алмазного вигладжування: а – $S=0,05\text{мм/об}$; б – $S=0,1\text{мм/об}$; в – $S=0,15\text{мм/об}$

Визначення величини впливу режимних параметрів алмазного

вигладжування на формування ступені деформаційного зміцнення сплавів на основі алюмінідів титану OX45-3ODS виконано дисперсійний аналіз (табл. 4.8) на основі проведеного повнофакторного експерименту.

Таблиця 4.8

Дисперсійний аналіз впливу режимних параметрів алмазного вигладжування на формування ступені деформаційного зміцнення сплаву на основі алюмінідів титану OX45-3ODS

Фактор	SS	df	MS	F	P
F(L)	0,147226	1	0,147226	21,49915	0,000159
(2)s(L)	0,025689	1	0,025689	3,75129	0,067023
r(Q)	0,031296	1	0,031296	4,57013	0,045066
1Lby2Q	0,040899	1	0,040899	5,97245	0,023927
1Qby3L	0,055225	1	0,055225	8,06438	0,010124
2Lby3Q	0,037378	1	0,037378	5,45819	0,029998
Помилка	0,136960	20	0,006848		
Сумарна дисперсія	0,474674	26			

Дисперсійний аналіз результатів повнофакторного експерименту (табл. 4.8) показав, що найбільший вплив на ступінь деформаційного зміцнення має зусилля вигладжування та його комбінування, певною мірою, з подачею вигладжування. Для досягнення раціональної ступені деформаційного зміцнення достатньо взяти максимальне зусилля вигладжування у досліджуваному діапазоні.

Прогнозування отримуваної ступені деформаційного зміцнення від різного поєднання режимних параметрів виконано регресійний аналіз у програмному забезпеченні Statistica. Результат регресійного аналізу показано на рис. табл. 4.9.

Регресійний аналіз зміни ступеню наклепу від різного поєднання режимних параметрів алмазного вигладжування

Фактор	Коефіцієнти регресії	Помилка	t(14)	p	Нижня межа довірчого інтервалу	Верхня межа довірчого інтервалу
Вільний член	0,617	0,1986	3,10569	0,007744	0,191	1,043
(1)f(L)	5,907	1,5021	3,93250	0,001503	2,685	9,129
f(Q)	-17,217	3,5587	-4,83804	0,000263	-24,850	-9,585
(2)s(L)	-26,537	5,7237	-4,63629	0,000385	-38,813	-14,261
S(Q)	154,164	32,1935	4,78866	0,000289	85,116	223,212
1Qby2L	121,953	39,7843	3,06535	0,008390	36,624	207,281
1Qby2Q	-567,653	196,8812	-2,88323	0,012034	-989,921	-145,385
1Lby3L	-1,629	0,5195	-3,13654	0,007284	-2,744	-0,515
1Qby3L	3,636	1,0801	3,36612	0,004614	1,319	5,952
2Lby3L	13,132	2,8874	4,54818	0,000455	6,939	19,325
2Lby3Q	-2,021	0,5273	-3,83250	0,001830	-3,152	-0,890
2Qby3L	-87,932	20,8773	-4,21182	0,000870	-132,709	-43,154
2Qby3Q	14,534	3,9864	3,64596	0,002646	5,984	23,084

В результаті регресійного аналізу отримано рівняння, що дозволяє прогнозувати величину ступеня деформаційного зміцнення від того чи іншого поєднання режимних параметрів:

$$S_{H\mu} = 0,6 + 5,9 \cdot F - 17,2 \cdot F^2 - 26,5 \cdot S + 154,2 \cdot S^2 + 121,9 \cdot F^2 \cdot S - 567,6 \cdot F^2 \cdot S^2 - 1,6 \cdot F \cdot Rsf + 3,6 \cdot F^2 \cdot Rsf + 13,1 \cdot S \cdot Rsf - 2 \cdot S \cdot Rsf^2 - 87,9 \cdot S^2 \cdot Rsf + 14,5 \cdot S^2 \cdot Rsf^2.$$

Оцінку адекватності отриманого регресійного рівняння побудовано графік відповідності передбачуваних значень спостережуваним (рис. 4.11.).

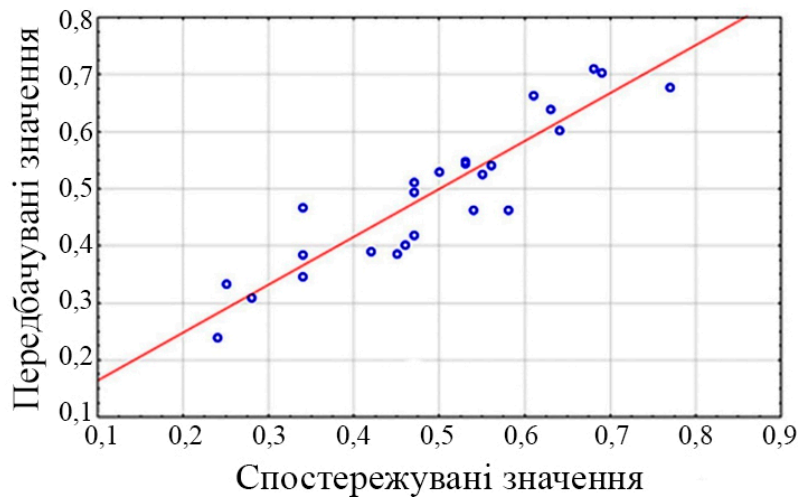


Рис. 4.11. Відповідність передбачуваних значень спостережуваним значенням

Передбачувані значення (рис. 4.11) не мають високої розбіжності зі значеннями отриманими експериментально, тому можна зробити висновок, що отримане регресійне рівняння має достатню адекватність та його можна використовувати для прогнозування величини ступені деформаційного зміцнення залежно від того чи іншого поєднання режимних параметрів. Встановлені критичні значення режимних параметрів показані у табл. 4.10.

Таблиця 4.10

Критичні значення режимних параметрів

Фактор	Мінімум	Критичне значення	Максимум
F, кН	0,100000	0,358696	0,400000
S, мм/об	0,050000	0,127000	0,150000
R _{sf} , мм	1,000000	2,603846	4,000000

Шляхом статистичної обробки визначено раціональне поєднання режимних параметрів вигладжування, при якому ступінь деформаційного зміцнення є

максимальним (зусилля – 360 Н, подача – 0,13 мм/об, радіус сфери – 2,6 мм).

4.1.4. Зменшення алмазним вигладжуванням пористості деталі зі сплаву на основі алюмінідів титану OX45-3ODS

Як вже було сказано вище, одним з головних недоліків порошкової металургії та адитивних технологій є залишкова пористість, яка сприяє зниженню міцності, пластичності, в'язкості руйнування, тріщиностійкості, оброблюваності різанням, а також призводить до зниження триботехнічних характеристик [113].

Актуальною задачею сучасного виробництва деталей ГТД літальних апаратів є визначення оптимальних режимів алмазного вигладжування поверхневого шару деталей зі сплавів на основі алюмінідів титану, отриманих методом селективного лазерного спікання, за критерієм отримання мінімальної залишкової пористості. Для вирішення поставленої задачі на основі обраного раніше метода зміцнення алмазним вигладжуванням виконано дослідження впливу режимних параметрів зміцнення на параметри залишкової пористості.

Предметом дослідження є залежності зміни параметрів порового простору від параметрів алмазного вигладжування плоских зразків, отриманих за вказаною вище технологією. При аналізі мікрофотографій поверхні шліфа використали програму аналізу зображень Image Pro Plus.

Для досліджень використали стандартні вигладжувачі з радіусом сфери алмазу (R_{sf}) 1,0 мм, 2,5 мм і 4 мм. Обробка виконувалася із зусиллям вигладжування (F) 0,1; 0,3; 0,4кН; з подачею (S) 0,05; 0,1; 0,15мм/об; середнє значення початкової пористості становило 25% (табл. 4.11).

Режими алмазного вигладжування зразків зі сплаву OX45-3ODS

№	F (кН)	S (мм/об)	R _{sf} (мм)	П %	№	F (кН)	S (мм/об)	R _{sf} (мм)	П %
1	0,1	0,05	1	24,6	15	0,3	0,1	4	16
2	0,1	0,05	2,5	12,33	16	0,3	0,15	1	13
3	0,1	0,05	4	18,66	17	0,3	0,15	2,5	11
4	0,1	0,1	1	13	18	0,3	0,15	4	15
5	0,1	0,1	2,5	18,33	19	0,4	0,05	1	10
6	0,1	0,1	4	16,66	20	0,4	0,05	2,5	15
7	0,1	0,15	1	10	21	0,4	0,05	4	16
8	0,1	0,15	2,5	13	22	0,4	0,1	1	11
9	0,1	0,15	4	11	23	0,4	0,1	2,5	13
10	0,3	0,05	1	11,66	24	0,4	0,1	4	10
11	0,3	0,05	2,5	15,2	25	0,4	0,15	1	15
12	0,3	0,05	4	10	26	0,4	0,15	2,5	12
13	0,3	0,1	1	10	27	0,4	0,15	4	18
14	0,3	0,1	2,5	11					

До основних параметрів пористості слід віднести: параметр П (пористість) дозволить визначити пористість в поперечному перерізі зразка; е (ексцентриситет) дасть можливість оцінити, як впливають параметри обробки на витягнутість пір; Р (периметр) дає уявлення про зміну довжини контуру пори відносно різних режимів зміцнення; у свою чергу оцінка D (фрактальна розмірність) дозволить визначити, наскільки контур пори можна описати елементарними елементами, що повторюються (рис. 4.12.) [114].

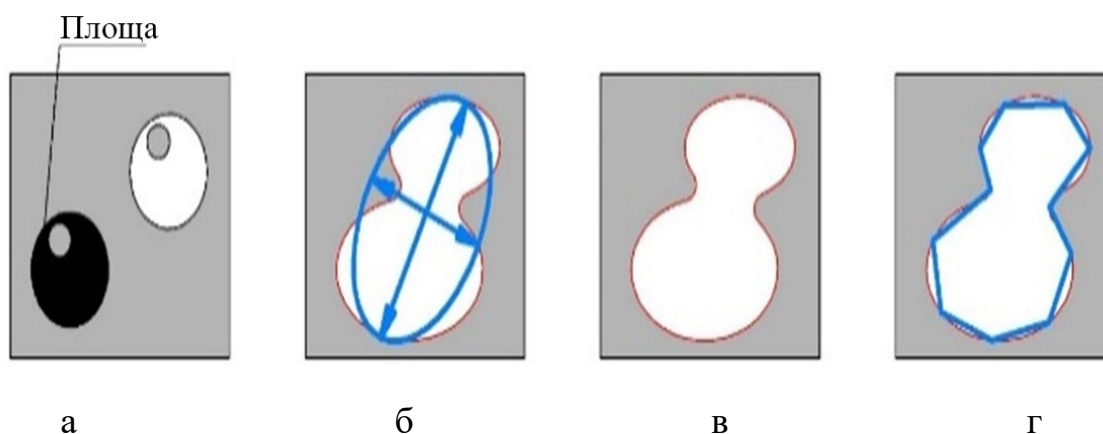


Рис. 4.12. Схема виміру параметрів порового простору: а – Π (пористість); б – e (ексцентриситет); в – P (периметр); г – D (фрактальна розмірність)

Визначено, що середня пористість поверхневого шару сплаву на основі алюмінідів титану OX45–3ODS, отриманого селективним лазерним спіканням, складає 20% (Дод. Г). Її наявність та хаотичний розподіл пор значно ускладнює процес зміцнення деталі. Застосування алмазних вигладжувачів малих радіусів призводить до того, що інструмент провалюється в пори і замість пластичної деформації відбувається мікрорізання. Внаслідок нерівномірного розподілу тупикових пор в точці контакту інструменту з поверхнею обробки виникають різні умови деформації. Пори мають круглу форму, утворюють на поверхні "рвані" краї, які можуть бути місцями початку руйнування. Аналіз мікрофотографій поверхневого шару зразків, зміцнених з різними режимами, підтверджує зроблені раніше припущення. Так, обробка по режимах № 3 ($F=100$ Н, $S=0,05$ мм/об, $Rsf=4$ мм) і № 11 ($F=300$ Н, $S=0,05$ мм/об, $Rsf=2,5$ мм) підтверджують припущення про те, що невдале поєднання режимних параметрів може привести до розтріскування поверхні зміцнення (Дод Г), у свою чергу їх оптимальне поєднання (Дод Г) режим № 14 ($F=300$ Н, $S=0,1$ мм/об, $Rsf=2,5$ мм) знижує залишкову пористість поверхні і поверхневого шару.

Оцінку взаємозв'язку між параметрами залишкової пористості виконано на основі кореляційного аналізу. У зв'язку з тим, що розподіл пор на поверхні зразка випадковий, залишкова пористість після вигладжування не підкоряється закону

нормального розподілу. Це призвело до необхідності використання коефіцієнта рангової кореляції Спірмена (табл. 4.12).

Таблиця 4.12

Матриця парних кореляцій параметрів пористості

Параметри	П	D	P	e
П	1	0,46	0,83	0,57
D	0,46	1	0,45	0,327
P	0,83	0,45	1	0,887
e	0,57	0,32	0,88	1

Встановлено, що усі досліджувані параметри залишкової пористості мають сильний взаємозв'язок (табл. 4.12). У зв'язку з цим подальшу оптимізацію режимів зміцнення виконували на підставі дослідження параметру пористості П. Аналіз результатів експерименту за діаграмами Парето дозволив встановити вплив режимів вигладжування та їх взаємодій на пористість поверхневого шару (рис. 4.15).

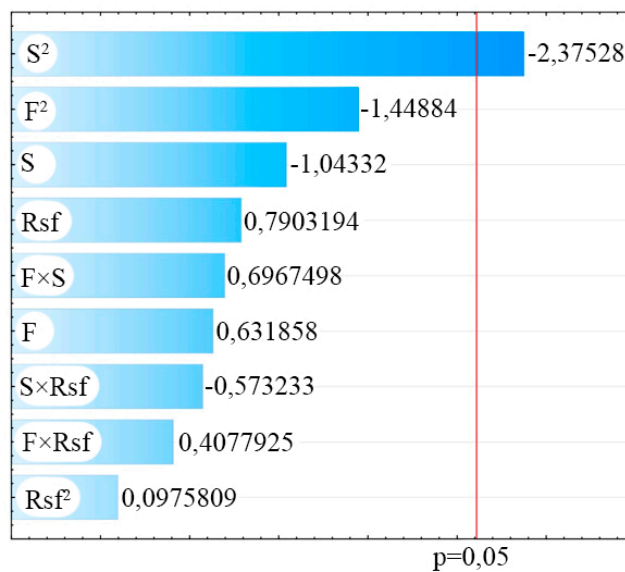


Рис. 4.16. Діаграма Парето для моделі впливу режимів алмазного вигладжування на пористість

Встановлено, що найбільший вплив має подача і сила вигладжування.

Отримано регресійне рівняння, яке дозволяє прогнозувати величину залишкової пористості від різного поєднання режимних параметрів алмазного вигладжування. В якості незалежних змінних (чинників) вибрані режимні параметри процесу зміцнення (табл. 4.11). В якості функції відгуку – площа пор. Регресійне рівняння має вигляд:

$$\begin{aligned} \Pi = & 0,25 - 0,1 \cdot R + 3,4 \cdot F^2 + 15,6 \cdot S^2 - 16,8 \cdot Pr^2 - 35 \cdot F \cdot S + 0,6 \cdot F \cdot R + 0,7 \cdot \\ & R \cdot Pr - 0,4 \cdot F \cdot S \cdot R - 3,4 \cdot F \cdot R \cdot Pr + 72,5 \cdot F^2 \cdot S - 0,03 \cdot R^2 \cdot F - 77,7 \cdot F^2 \cdot \\ & Pr + 181,9 \cdot F \cdot Pr^2. \end{aligned}$$

Адекватність моделі оцінювали за критерієм Фішера. Для визначення дисперсії відтворюваності виконували дублювання 11-ти дослідів в центрі плану експерименту (таблиця. 4.13). Її однорідність оцінювали за критерієм Кохрена.

Таблиця 4.13

Оцінка дисперсії відтворюваності регресійної моделі.

№	F, кН	S мм/об	R _{sf} , мм	Π, %	$A_{\phi}^{експ}$	$A_{\phi}^{расч}$
1	0,15	0,07	1,5	12,3	0,125	0,108
2	0,15	0,10	2,5	24,5	0,359	0,395
3	0,15	0,13	2,0	15,1	0,162	0,114
4	0,20	0,07	2,5	14,6	0,178	0,168
5	0,20	0,10	2,0	13,6	0,142	0,095
6	0,20	0,13	1,5	17,2	0,179	0,183
7	0,25	0,07	2,0	16,5	0,237	0,253
8	0,25	0,10	1,5	12,4	0,144	0,067
9	0,25	0,13	2,5	18,3	0,227	0,255
10	0,22	0,12	3,0	15,1	0,136	0,110
11	0,18	0,25	2,5	17,1	0,208	0,213

Табличне значення критерію Фішера при рівні значущості 0,05 ($P=95\%$), числі ступенів свободи дисперсії адекватності і дисперсії відтворюваності рівним 10 складає $\Phi_{0,05;10;10}^{\text{табл}} = 2,98$. Розрахункове значення критерію Фішера склало $\Phi_{0,05;10;10}^{\text{розра}} = 2,54$. Враховуючи, що $\Phi^{\text{розра}} < \Phi^{\text{табл}}$ отриману регресійну модель можна вважати адекватною.

Встановлено, що залежності залишкової пористості поверхневого шару від зусилля та подачі вигладжування для різних радіусів вигладжувача мають екстремальний характер (рис. 4.15.).

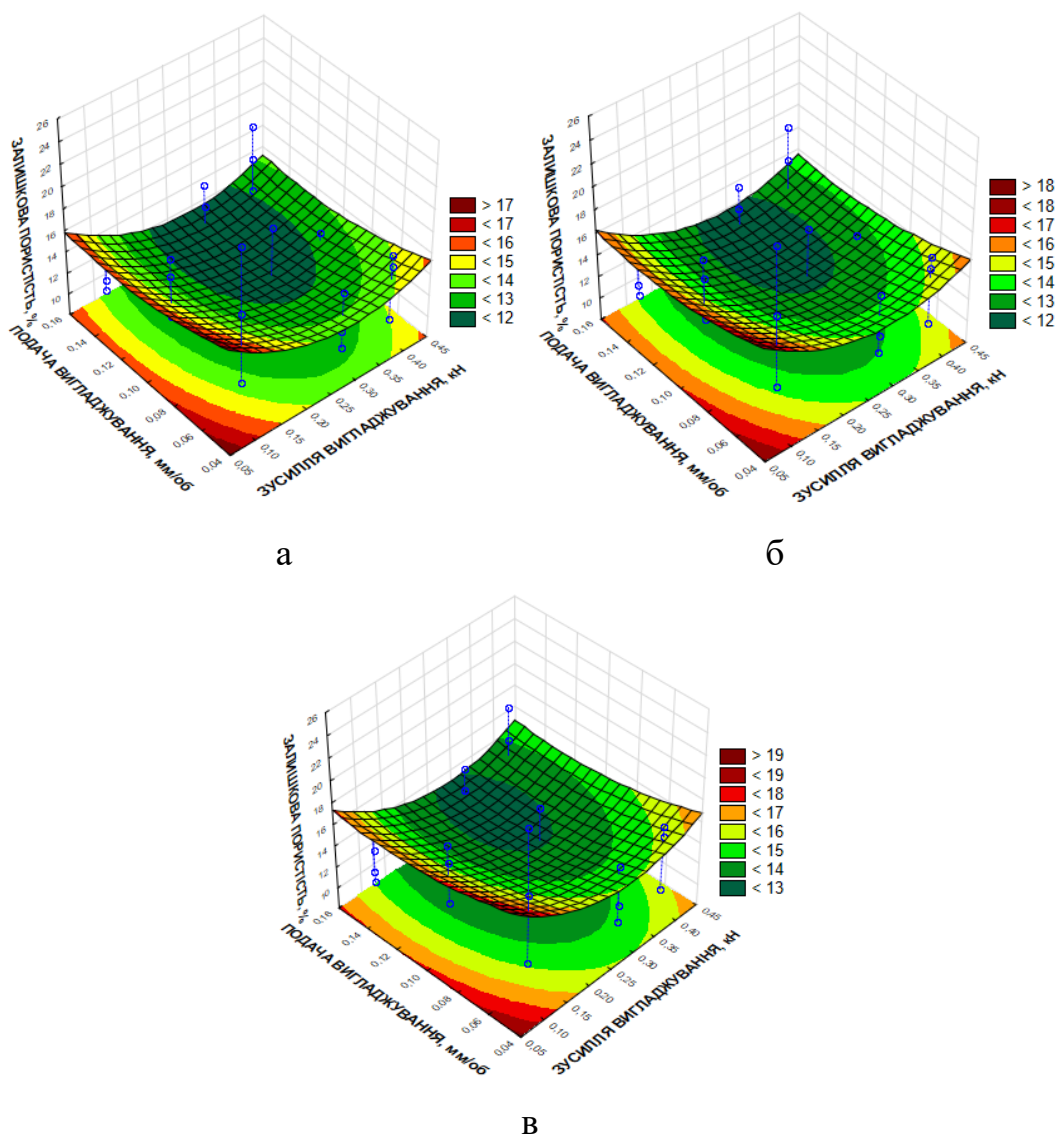


Рис. 4.15. Вплив зусилля та подачі на пористість при обробці різними вигладжувачами: а – $R_{sf} = 1\text{мм}$; б – $R_{sf} = 2,5\text{мм}$; в – $R_{sf} = 4\text{мм}$

Раціональним поєднанням режимних параметрів (рис. 4.16. а) буде вигладжування із зусиллям 0,2 - 0,3 кН, при подачі 0,12 - 0,15 мм/об. Мінімальні значення залишкової пористості отримано при використанні вигладжувача радіусом 1мм, проте, як вже було зазначено, його застосування призводить до розтріскування поверхні. З вище сказаного витікає, що раціональним радіусом вигладжувача буде 2,5 мм (рис. 4.15. б). Застосування вигладжувача радіусом 4 мм (рис. 4.15. в) призводить до значного збільшення питомого контактного тиску, що призводить до деформації при обробці тонкостінної деталі.

На практиці необхідно підбирати радіус сфери алмазного вигладжувача виходячи з можливих геометричних обмежень при зміцненні конструктивних концентраторів напружень і величини початкової пористості. І, як наслідок, необхідно коригувати режими зміцнення, виходячи з необхідного радіусу сфери алмазного вигладжувача.

Для знаходження оптимальних режимів вигладжування, які забезпечують мінімальну залишкову пористість, виконали оцінку поверхні відгуку, побудованої на підставі нелінійної регресійної моделі. Оцінка виконувалася по методу крутого сходження Бокса-Уілсона (табл. 4.14).

Таблиця 4.14

Оптимальні режими, отримані на підставі аналізу поверхні відгуку по методу крутого сходження Бокса-Уілсона.

Чинник	Мінімум	Оптимальні значення	Максимум
Площа залишкових пор, П, %			
F, кН	0,10	0,21	0,40
S, мм/о	0,05	0,11	0,15
R _{sf} , мм	1,00	4,60	4,00

Враховуючи можливі конструкційні обмеження реальних тонкостінних деталей оптимальним алмазним вигладжувачем для забезпечення найкращого

результату, буде 2,5 мм. Оптимальним зусиллям вигладжування буде 0,22 – 0,3 кН. Оптимальною подачею буде 0,1 мм/об, проте цей параметр може змінюватись залежно від устаткування, що використовується, в цьому випадку потрібно брати максимально близьке до встановленого значення.

Встановлено, що найбільш значимим, серед параметрів пористості, при зміцненні сплаву на основі алюмініду титана є залишкова пористість P_r . Встановлено, що на неї великий вплив має початкова пористість P_r , її розподіл носить випадковий характер та може змінюватись в значних межах.

На підставі аналізу статистичних даних отримано регресійне рівняння з перебором взаємодій параметрів (зусилля вигладжування F , подачі S , радіусу сфери алмазного індентора R_{sf}), що описують сукупний вплив досліджуваних чинників на залишкову пористість. Виконана перевірка адекватності нелінійної регресійної моделі на підставі критерію Фішера.

Виконана оптимізація режимних параметрів по методу крутого сходження Бокса-Уілсона. Встановлено, що раціональними режимними параметрами алмазного вигладжування поверхні зразка, початкова пористість якого складає 15%, з точки зору економічно доцільної залишкової пористості, є вигладжування із зусиллям 0,3 кН, подачею 0,1 мм/об, алмазним вигладжувачем радіусом 2,5 мм.

4.2. Формування алмазним вигладжуванням поверхневого шару деталей зі сплаву INCONEL 718

Одним із перспективних методів виробництва деталей ГТД літальних апаратів з нікелевого сплаву INCONEL 718, є отримання з порошку селективним лазерним спіканням. Він характеризується високими механічними властивостями, такими як підвищена міцність і корозійна стійкість при високих температурах [115], [116].

Метою дослідження є поліпшення якості поверхневого шару деталей, синтезованих з порошків нікелевого сплаву INCONEL 718 шляхом застосування

алмазного вигладжування. Об'єктом дослідження є режимні параметри алмазного вигладжування жароміцного нікелевого сплаву INCONEL 718, отриманого за технологією селективного лазерного спікання порошків. Предметом дослідження були залежності зміни шорсткості і параметрів ступені деформаційного зміцнення від параметрів алмазного вигладжування плоских зразків.

Для досліджень використовували стандартні вигладжувачі з радіусом сфери алмазу (R_{sf}) 1,0 мм, 2,5 мм та 4 мм. Обробка виконувалася із зусиллям вигладжування (F) 0,2; 0,3; 0,4кН; з подачею (S) 0,05; 0,1; 0,15мм/об.

З метою заощадження часу та матеріальних витрат був виконаний дробовий факторний експеримент для дослідження впливу режимних параметрів алмазного вигладжування на шорсткість та ступінь деформаційного зміцнення поверхневого шару зразків з нікелевого сплаву INCONEL 718. Дослідження проводилися відповідно до теорії планування експерименту для дробового факторного експерименту типу 3^{2-1} , матриця планування експерименту показана в табл. 4.15. При плануванні експерименту були задані чинники процесу алмазного вигладжування: зусилля вигладжування F , кН (X_1); подача вигладжування S , мм/об (X_2); радіус сфери алмазного вигладжувача R_{sf} , мм (X_3). Як функція відгуку обрано: середнє арифметичне з абсолютних значень відхилень профілю в межах базової довжини R_a , мкм (Y_1); величина ступені деформаційного зміцнення, $S_{H\mu}$, % (Y_2) розрахована на основі вимірювання мікротвердості.

Таблиця 4.15

Матриця планування дробового факторного експерименту

№	X_1	X_2	X_3	№	X_1	X_2	X_3
1	-1	-1	-1	6	-1	-1	0
2	0	+1	-1	7	0	-1	+1
3	+1	0	-1	8	+1	+1	+1
4	0	0	0	9	-1	0	+1
5	+1	-1	0				

Обробку поверхневого шару зразків виконували відповідно до плану експерименту (таблиця. 4.16).

Таблиця 4.16

Значення чинників в експерименті

№	F (кН)	S (мм/об)	R _{sf} (мм)	Ra (мкм)	S _{Hμ} (%)
1	0,2	0,05	1	1,6	37,04
2	0,3	0,15	1	4,92	59,33
3	0,4	0,10	1	3,82	42,61
4	0,3	0,10	2,5	0,74	45,68
5	0,4	0,05	2,5	0,73	35,38
6	0,2	0,15	2,5	0,88	26,18
7	0,3	0,05	4	0,47	3,89
8	0,4	0,15	4	1,22	8,07
9	0,2	0,10	4	0,62	23,95

Профіль поверхонь показана на рис. 4.16. На зразках після алмазного вигладжування спостерігалось ущільнення структури поверхневого шару, що веде до підвищення мікротвердості та ступені деформаційного зміцнення. Чітко видима зона зміцненого поверхневого шару.

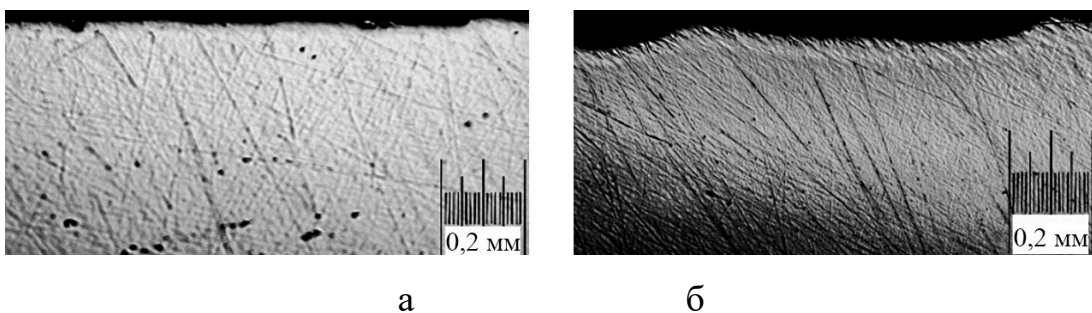


Рис. 4.16. Зображення поверхневого шару зразків зі сплаву INCONEL 718, зміцнених АВ з різними режимними параметрами (табл. 4.15): а – режим №1; б – режим №2;

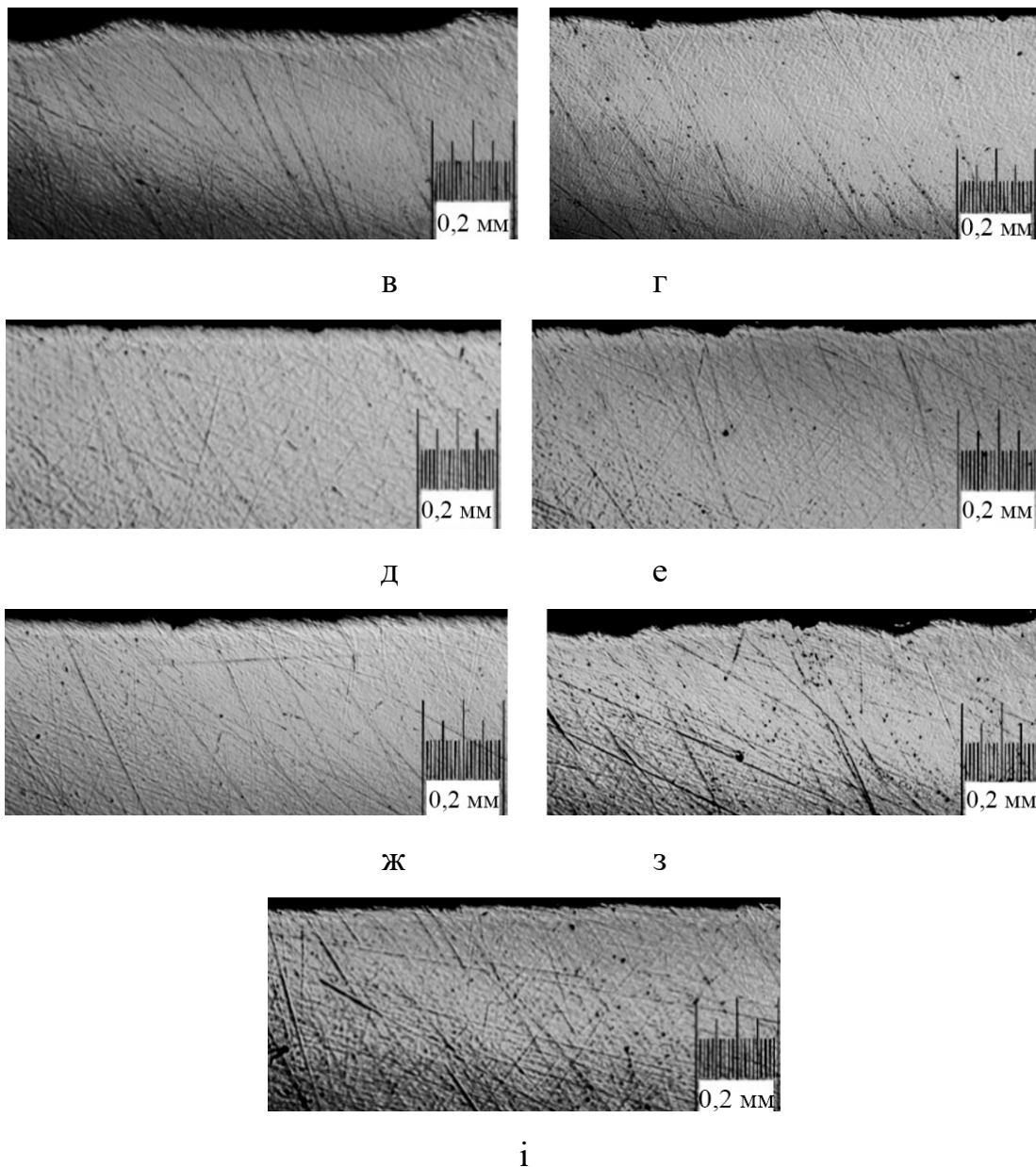


Рис. 4.16. Зображення поверхневого шару зразків зі сплаву INCONEL 718, зміцнених АВ з різними режимними параметрами (табл. 4.15) (Продовження): в – режим №3; г – режим №4; д – режим №5; е – режим №6; ж – режим №7; з – режим №8; і – режим №9

Використання вигладжувачів маленького радіусу одночасно з великою подачею призводить до погіршення поверхневого шару (рис. 4.16. в). Подальше збільшення зусилля вигладжування одночасно зі зменшенням подачі призводить до незначного покращення шорсткості (рис. 4.16. г.)

Визначено, що кращих показників якості та ступені деформаційного зміцнення поверхневого шару можна отримати, підібравши раціональне поєднання усіх режимних параметрів. Діаграми (рис. 4.17.) показують залежність величини шорсткості R_a та ступені деформаційного зміцнення $S_{H\mu}$ від різних режимних параметрів алмазного вигладжування. Для досягнення мінімальної шорсткості необхідно застосовувати вигладжувачі з великим радіусом сфери та призначати мінімально можливу подачу (рис. 4.18. а). Це у свою чергу йде в розріз з даними, отриманими для ступеню деформаційного зміцнення. Для практичного використання необхідно знайти поєднання режимних параметрів, при яких і ступінь деформаційного зміцнення, і шорсткість будуть найкращими.

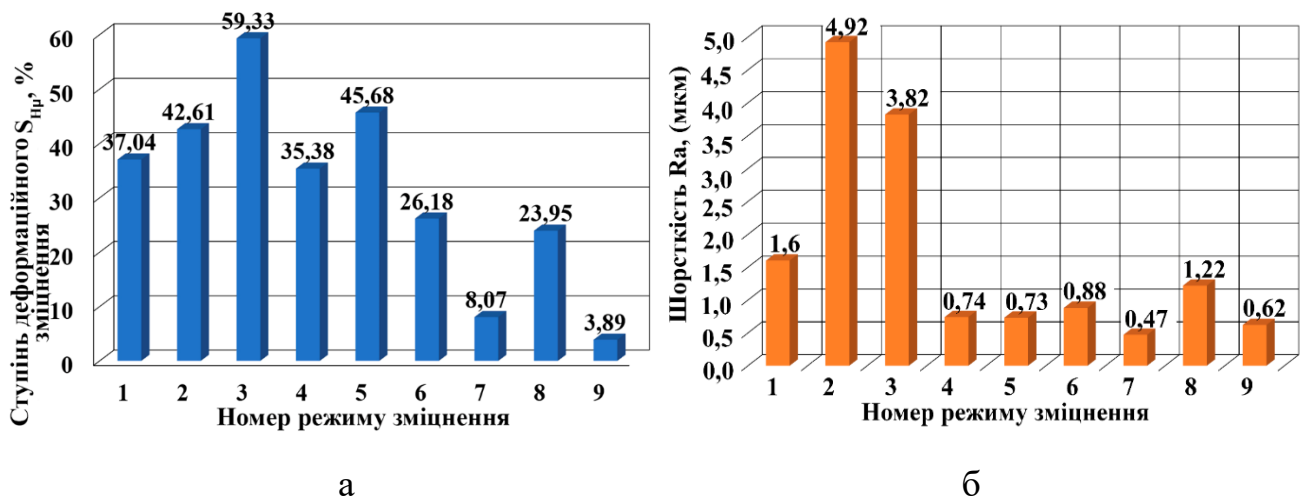


Рис. 4.18. Діаграми зміни ступені деформаційного зміцнення $S_{H\mu}$ (а) та шорсткості R_a (б) від різного поєднання режимних параметрів АВ

Виконана статистична обробка експериментальних даних на основі дисперсного аналізу (табл. 4.16). Де SS - сумарна дисперсія; df - число ступенів свободи; MS - середнє квадратичне значення; F - значення критерію Фішера; p - вірогідність нульової гіпотези для критерію Фішера (рівень значущості).

У таблиці 4.17 показано, що статистично найбільш значимими для отримання максимального ступені деформаційного зміцнення є зусилля вигладжування та радіус сфери вигладжувача, а для отримання мінімальної

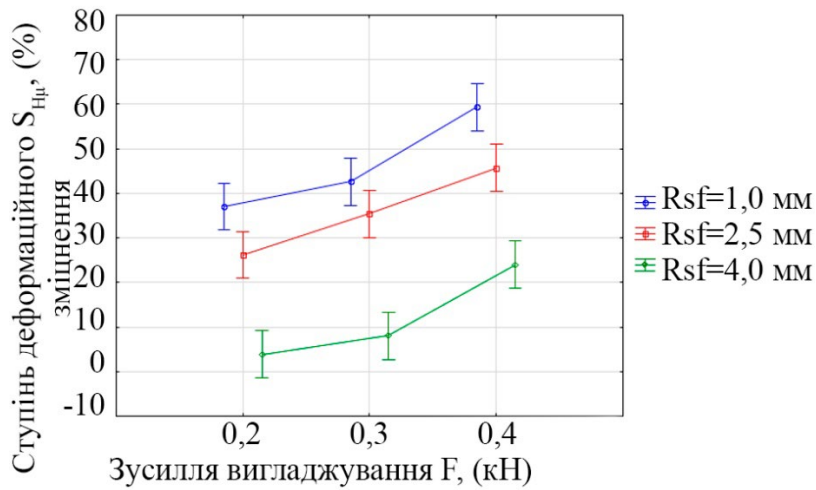
шорсткості – радіус сфери вигладжувача та подача. Отже, для обох параметрів найбільш значимим є радіус сфери вигладжувача.

Таблиця 4.17

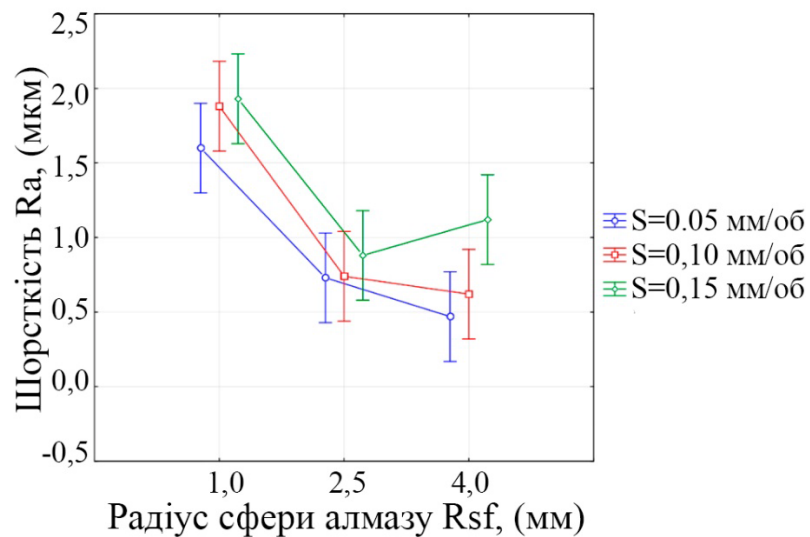
Дисперсійний аналіз залежності шорсткості Ra та ступені деформаційного зміцнення $S_{H\mu}$ від режимних параметрів алмазного вигладжування

Factor	SS	df	MS	Φ	p
Ступінь деформаційного зміцнення $S_{H\mu}$, %					
(1)F(кН)L+Q	8094,89	2	4047,44	58,2832	0,016868
(2)S(мм/об)L+Q	571,56	2	285,78	4,1152	0,195496
(3) R_{sf} (мм)L+Q	23936,89	2	11968,44	172,3456	0,005769
Помилка	138,89	2	69,44		
Сумарна дисперсія	32742,22	8			
Шорсткість Ra, мкм					
(1) R_{sf} (мм)L+Q	2,180356	2	1,090178	223,4989	0,004454
(2)S(мм/об)L+Q	0,216289	2	0,108144	22,1708	0,43158
(3)F(кН)L+Q	0,082956	2	0,041478	8,5034	0,105225
Помилка	0,009756	2	0,004878		
Сумарна дисперсія	2,489356	8			

Для візуалізації зроблених припущень, щодо впливу режимних параметрів алмазного вигладжування на шорсткість та ступінь деформаційного зміцнення деталі зі сплаву INCONEL 718 отриманого селективним лазерним спіканням, побудовано графік середніх значень (рис. 4.18.).



а

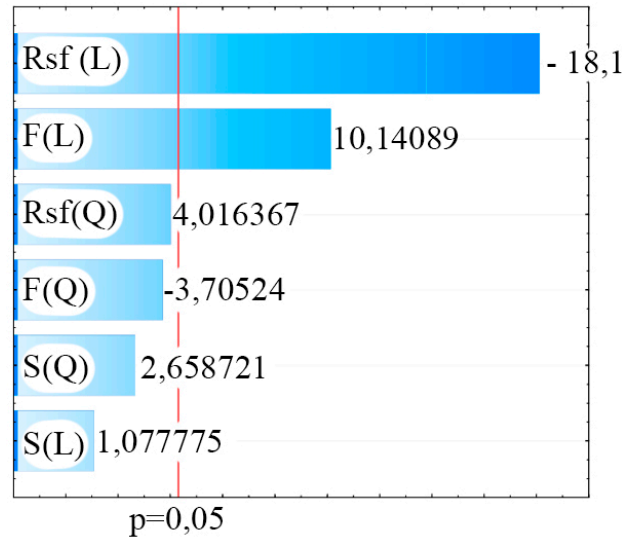


б

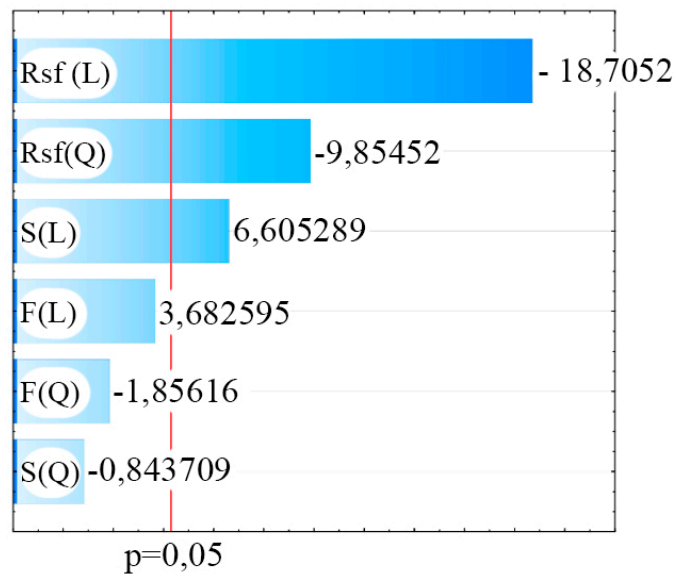
Рис. 4.18. Графік середніх значень впливу режимних параметрів АВ на ступінь деформаційного зміцнення $S_{H\mu}$ (а) та шорсткість Ra (б)

Рациональної степені деформаційного зміцнення (рис. 4.18. а) було досягнуто при застосуванні вигладжувача радіусом сфери 1 мм та максимальному зусиллі вигладжування. В той же час, для досягнення мінімальної шорсткості (рис. 4.18 б) потрібні вигладжувач з радіусом сфери 4 мм та мінімальна подача. Отже для одночасного отримання рациональної степені деформаційного зміцнення і мінімальної шорсткості радіус сфери вигладжувача повинен бути 2,5 мм.

Використовуючи діаграми Парето, визначено найбільш статистично значимі режимні параметри вигладжування для отримуваних раціональної степені деформаційного зміцнення та мінімальної шорсткості (рис. 4.19.).



а



б

Рисунок 4.19. Діаграми Парето впливу режимних параметрів АВ на цільові функції $S_{H\mu}$ (а) та Ra (б)

За діаграмами Парето (рис. 4.19) встановлено, що на ступінь деформаційного зміцнення та шорсткість статистично значимий вплив має радіус сфери алмазного вигладжувача. Подача та зусилля вигладжування мають різну значущість для різних цільових функцій.

Для прогнозування сукупного впливу режимних параметрів алмазного вигладжування на ступінь деформаційного зміцнення $S_{H\mu}$ та шорсткості Ra , отримані регресійні рівняння. В якості вхідних чинників вибрані режимні параметри процесу зміцнення (табл. 4.16).

$$S_{H\mu} = 600,12 - 965 \cdot F + 2183,3 \cdot F^2 + 231,3 \cdot S^2 + 11,5 \cdot R_{sf} - 10,5 \cdot R_{sf}^2$$

$$Ra = 3,17 - 5,28 \cdot F + 10,83 \cdot F^2 + 4,1 \cdot S - 1,46 \cdot R_{sf} + 0,22 \cdot R_{sf}^2$$

де: F - зусилля вигладжування, кН;

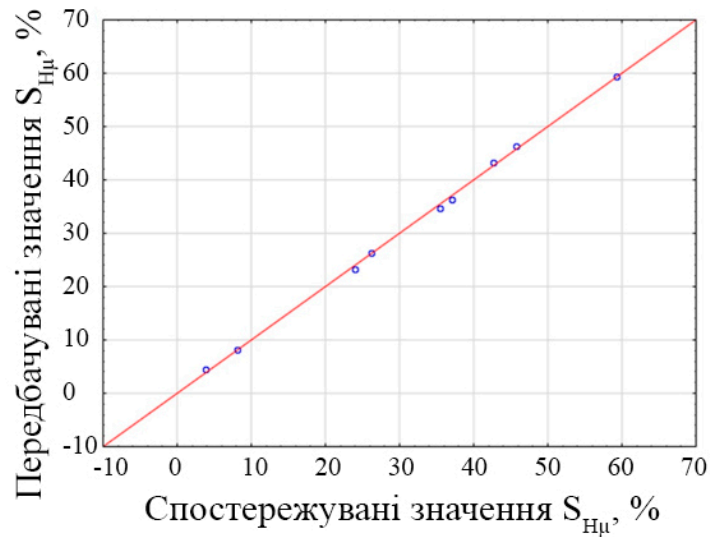
S - подача вигладжування, мм/о;

R_{sf} - радіус алмазного вигладжувача, мм;

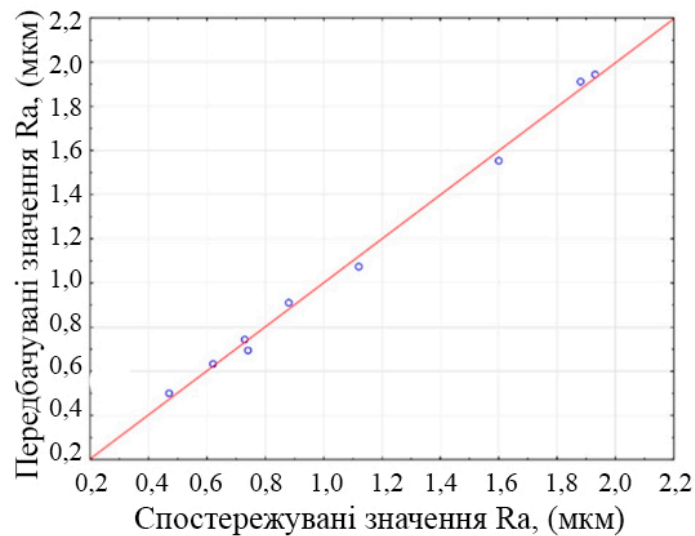
Ra - шорсткість, мкм;

$S_{H\mu}$ - ступінь деформаційного зміцнення, %.

Для оцінки якості моделі було побудовано графік передбачуваних та спостережуваних значень (рис. 4.20.). Оскільки точки на графіках розташовуються поряд з червоною лінією, то було зроблено висновок, що моделі якісні і їх можна використовувати для прогнозування впливу режимних параметрів алмазного вигладжування на ступінь деформаційного зміцнення та шорсткість деталей зі сплаву INCONEL 718, отриманих селективним лазерним спіканням.



а



б

Рис. 4.20. Графіки передбачуваних та спостережуваних значень параметрів $S_{H\mu}$ (а) та R_a (б)

Для практичного використання регресійних рівнянь виконали перевірку їх адекватності з використанням критерію Фішера. Для визначення дисперсії відтворюваності S_y^2 виконали дублювання п'яти дослідів в центрі плану експерименту. Її однорідність оцінювали за критерієм Кохрена. Результати дублюючих дослідів показані в таблиці. 4.18.

Таблиця 4.18

Оцінка дисперсії відтворюваності регресійної моделі.

№	F, кН	S, (мм/об)	R _{sf} , (мм)	$\sigma_{\phi}^{експ}$	$\sigma_{\phi}^{розн}$
Степінь деформаційного зміцнення S _{Hμ} , %					
1	0,15	0,07	1,5	518,12	513,56
2	0,15	0,10	2,5	531,36	525,16
3	0,15	0,13	2,0	514,73	502,63
4	0,20	0,07	2,5	521,84	536,09
5	0,20	0,10	2,0	510,63	531,33
Шорсткість Ra, мкм					
1	0,25	0,07	2,0	0,983	0,964
2	0,25	0,10	1,5	0,874	0,878
3	0,25	0,13	2,5	0,814	0,787
4	0,22	0,12	3,0	0,976	1,054
5	0,18	0,25	2,5	0,822	0,689

Табличне значення критерію Фішера при рівні значущості 0,05 (P=95%), числі ступенів свободи дисперсії адекватності та дисперсії відтворюваності рівним 5 склало $\Phi_{0,05;5;5}^{табл} = 5,05$. Розрахункове значення критерію Фішера для ступеню наклепу склало $\Phi_{0,05;5;5}^{розн, S_{H\mu}} = 4,66$, для шорсткості $\Phi_{0,05;5;5}^{розн, Ra} = 4,81$. Враховуючи, що $\Phi^{розн} < \Phi^{табл}$ отримані регресійні моделі можна вважати такими, що адекватно описують степінь деформаційного зміцнення та шорсткість після алмазного вигладжування, залежно від режимних параметрів процесу.

Для знаходження оптимальних режимних параметрів виконали оцінку регресійних рівнянь по методу крутого сходження Бокса-Уилсона. Результат показано в табл. 4.19.

Таблиця 4.19

Оптимальні режими, отримані на підставі аналізу регресійних рівнянь

Чинник	Спостережуваний мінімум	Оптимальні значення	Спостережуваний максимум
Степінь деформаційного зміцнення $S_{H\mu}$, %			
F, кН	0,2	0,221	0,4
S, мм/о	0,05	0,105	0,15
Rsf, мм	1,0	0,545	4,0
Шорсткість Ra, мкм			
F, кН	0,2	0,24	0,4
S, мм/о	0,05	0,02	0,15
Rsf, мм	1,0	3,32	4,0

Встановлено, що для степені деформаційного зміцнення і шорсткості одні й ті ж самі режимні параметри мають різний вплив. Вибираючи подачу вигладжування, необхідно враховувати можливості устаткування, тому вигладжування з подачам менше 0,1 мм/об не раціонально, хоча данні оптимізації показують інше. При виборі алмазного вигладжувача необхідно передусім враховувати геометрію оброблюваної поверхні деталі. Оптимальний радіус вигладжувача для отримання мінімальної шорсткості становить 4,0 мм. Проте його не можливо застосувати при зміцненні концентраторів напружень невеликого розміру. Для отримання максимального ступеня деформаційного зміцнення необхідно використати вигладжувач радіусом 0,5 мм. Проте, це призводить до збільшення шорсткості поверхні. Тому при наданні технологічних рекомендацій для обробки конкретних деталей та забезпечення їх якості необхідно виконувати оптимізацію за усіма параметрами обробки і вибирати режимні параметри з урахуванням отриманих даних. При виборі режимних параметрів необхідно враховувати, який параметр якості буде найбільш важливим для конкретної деталі,

оскільки це визначатиме вибір. Для забезпечення максимального ступеня деформаційного зміцнення та мінімальної шорсткості обробку деталей із жароміцного сплаву INCONEL 718 необхідно виконувати за наступними режимами: зусилля – 250 Н, подача – 0,1 мм/об, радіус сфери – 2,5 мм. [117].

4.3. Висновки

Виконані дослідження особливостей зміцнення алмазним вигладжуванням деталей, виконаних з порошкових матеріалів, сплаву на основі алюмініду титана OX45-3ODS та жароміцного нікелевого сплаву INCONEL 718, синтезованих за допомогою селективного лазерного спікання.

Встановлено, що для вигладжування сплаву на основі алюмініду титана OX45-3ODS необхідно застосовувати алмазні вигладжувачі з радіусом сфери алмазу більше 2,5 мм. Вигладжувач з меншим радіусом, попадаючи на тупикові пори, призводить до погіршення шорсткості поверхні внаслідок її розтріскування. Застосування для обробки вигладжувачів з радіусом сфери 4 мм недоцільно – це значно збільшує площу контакту вигладжувача з поверхнею обробки та для забезпечення одного й того ж питомого тиску необхідно прикладати значно більші зусилля, що в свою чергу також призводить до розтріскування матеріалу.

Встановлено, що алмазне вигладжування ефективно застосовувати для ущільнення поверхневого шару виробів з порошкових матеріалів, на прикладі сплаву на основі алюмініду титана OX45-3ODS. Мінімальні значення залишкової пористості можна досягти при алмазному вигладжуванні з режимними параметрами: зусиллі 0,2 - 0,3 кН, подачі 0,12 - 0,15 мм/об, та радіусі сфери алмазного вигладжувача 2,5 мм.

Систематизація проведених досліджень дозволила встановити, що мінімальної шорсткості та раціональної степені деформаційного зміцнення можна досягти при різних поєднаннях режимних параметрів. Встановлено, що раціональними режимними параметрами алмазного вигладжування поверхні

зразків зі сплаву на основі алюмініду титана OX45-3ODS, є вигладжування з зусиллям 0,3 кН, подачею 0,1 мм/об, алмазним вигладжувачем радіусом 2,5 мм.

Проведені дослідження довели раціональність застосування алмазного вигладжування для зміцнення нікелевого сплаву INCONEL 718, отриманого селективним лазерним спіканням. Як і для сплавів на основі алюмініду титана, використання вигладжувачів маленького радіусу одночасно з великою подачею призводить до погіршення якості поверхневого шару зразків зі сплаву INCONEL 718. Встановлено що на шорсткість та степінь деформаційного зміцнення поверхневого шару режимні параметри мають різний вплив. Раціональним поєднанням режимних параметрів, при яких і ступінь наклепу, і шорсткість будуть найкращими є обробка з зусиллям вигладжування $F = 0,25$ кН, подачею $S = 0,1$ мм/об, радіусом сфери алмазного вигладжувача $R_{sf} = 2,5$ мм.

Розроблені математичні моделі, які дозволяють прогнозувати параметри якості поверхневого шару після алмазного вигладжування в залежності від того чи іншого поєднання режимних параметрів.

Матеріали розділу опубліковані в наступних роботах: [111], [112], [114], [117].

РОЗДІЛ 5

ПРОГНОЗОВАНІ ЕФЕКТИ ЗМІЦНЕННЯ АЛМАЗНИМ ВИГЛАДЖУВАННЯМ ДЕТАЛЕЙ, ОТРИМАНИХ ЗА ДОПОМОГОЮ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПІКАННЯ

5.1. Дослідження впливу алмазного вигладжування на статичний запас міцності застосування для деталей ГТД літальних апаратів, отриманих селективним лазерним спіканням

Головним завданням дослідження є всебічна оцінка ефектів від комерційного застосування технології селективного лазерного спікання з подальшим зміцнення алмазним вигладжуванням. Для її досягнення були вирішені завдання з класифікації ефектів від застосування нової технології, їх оцінка та розрахунок собівартості отримання деталей по відповідній технології.

Об'єктом дослідження були аспекти впливу реалізації цієї технології на різні галузі діяльності людини.

Предметом дослідження був вплив застосування селективного лазерного спікання та алмазного вигладжування на статичний запас міцності, собівартість виготовлення деталей за базовою і альтернативною технологією, необхідні капітальні вкладення для реалізації вказаних технологій.

Метою дослідження був аналіз технічних та економічних ефектів від застосування технології селективного лазерного спікання та алмазного вигладжування для виробництва диска і моноколеса газотурбінного двигуна літального апарату (рис. 5.1.).

Задачею дослідження є оцінка запасів статичної міцності та економічного ефекту при використанні в виробництві вказаних деталей технології селективного лазерного спікання та алмазного вигладжування.

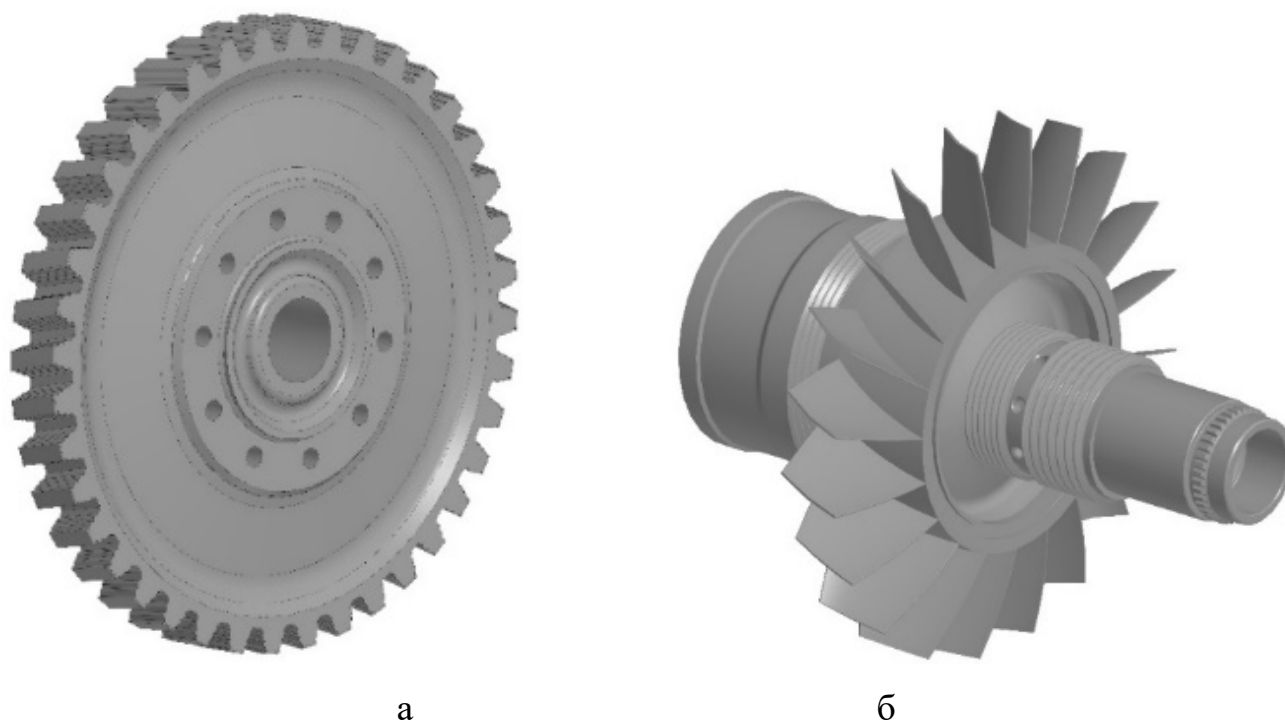


Рис. 5.1. Деталі ГТД літального апарату : а – диск; б – моноколесо

Аналіз матеріалів, які використовувалися для виготовлення досліджуваних деталей, за традиційною та альтернативною технологією показаний в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1

Традиційні та альтернативні матеріали для виробництва деталей ГТД

Сплав	Опис	Переваги	Недоліки
BT 8	Жароміцний титановий сплав, використовується для виготовлення деталей, працюючих при температурі до +450°С	Висока міцність та жароміцні властивості, тріщиностійкість.	Висока вартість, необхідність імпорту, не зварюваний, невисокі технологічні властивості.

Сплав	Опис	Переваги	Недоліки
OX45-3ODS (СЛС)	Перспективний титановий сплав на основі алюмінідів титану, що отримується селективним лазерним спіканням.	Низька питома вага; підвищені механічні властивості; високий рівень жароміцності та жаростійкості.	Низька пластичність, в'язкість, низька оброблюваність, чутливість до поверхневих дефектів, залишкова пористість, висока вартість порошку.
INCONEL 718	Жароміцний високоякісний сплав, що має підвищену корозійну стійкість	Висока міцність та корозійна стійкість, зварюваність, опір повзучості, високі механічні властивості при підвищеній температурі.	Висока схильність до наклепу, складність механічної обробки.
INCONEL 718(СЛС)	Сплав, що отримується селективним лазерним спіканням	Низька питома вага, задані механічні властивості за рахунок варіювання параметрів друку	Висока вартість порошку, рівномірність, висока схильність до наклепу, складність механічної обробки.

Традиційні сплави ВТ8 та INCONEL 718 (вітчизняний аналог ЕП718), аналіз яких представлений в таблиці 5.1, є одними з найпоширеніших в авіаційній і ракетно-космічній техніці. Матеріали, які пропонуються в якості альтернативи, мають більш високі характеристики при меншій вазі, незважаючи на більш високу вартість. Їх застосування є раціональним внаслідок значної економії ваги деталі при

виготовленні її методом СЛС. Механічні та фізичні властивості матеріалів показані в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2

Властивості традиційних та альтернативних матеріалів для виробництва деталей ГТД [10, 11]

Сплав	E, МПа	ρ , кг/м ³	$\sigma_{0,2}$, МПа	μ	δ ,%
BT 8	$1,2 \times 10^5$	4520	785	0,3	10
OX45-3ODS (СЛС)	$0,95 \times 10^5$	4200	795	0,3	5
INCONEL 718	2×10^5	8190	960	0,29	24
INCONEL 718 (СЛС)	$1,13 \times 10^5$	7940	960	0,278	21

Оцінка технічного ефекту виконувалася на підставі оцінки статичного запасу міцності, отриманого на підставі аналізу напружено-деформованого стану (НДС), за методом кінцевих елементів (МКЕ) досліджуваних деталей.

Зважаючи на складну геометрію досліджуваних деталей було виконано згущування розрахункової сітки в місцях передбачуваної концентрації напруги.

Порівняння результатів розрахунку НДС для моделей деталей «Диск» і «Моноколесо», виконаних з традиційних матеріалів, та моделей деталей, виконаних з порошкових матеріалів за допомогою СЛС і зміцнених алмазним вигладжуванням, дозволили оцінити міру впливу різних матеріалів і технологій виготовлення на статичний запас міцності цих деталей. Аналіз виконували в наступній послідовності: побудова моделі, придатної для МКЕ; завдання властивостей матеріалу; розбиття моделі на сітку кінцевих елементів; додання до моделі граничних умов; чисельне рішення.

На рис. 5.2. показані місця, в яких виконувався вимір напружень, що виникає від прикладених навантажень при заданих обмеженнях переміщень.

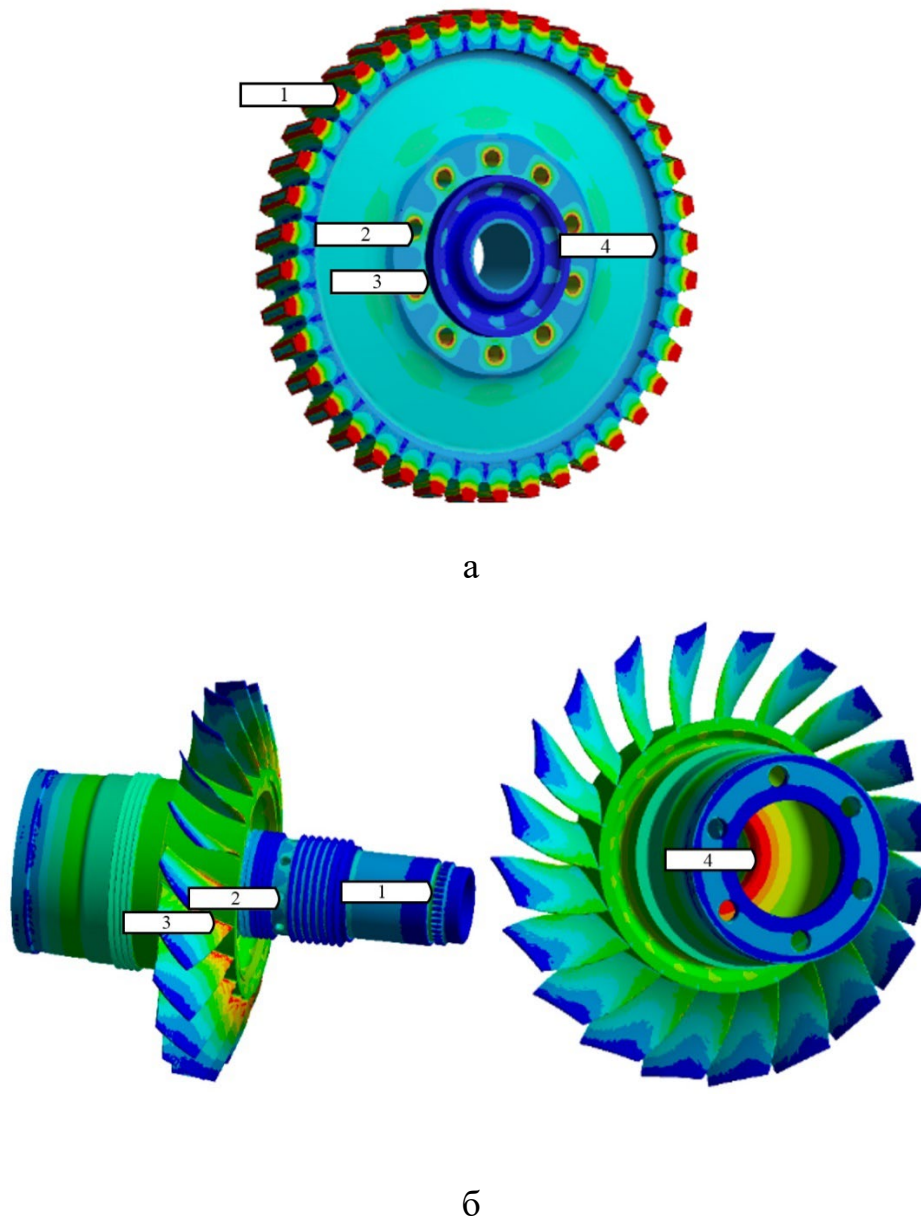


Рис. 5.2. Місця вимірювання напружень досліджуваних деталей : а – диск;
б – моноколесо

З результатів розрахунку напружено-деформованого стану деталей встановлено, що значні напруження виникають не тільки в області ялинкового пазу (рис. 5.2.а) та прикомльової зоні лопаток (рис. 5.2.б), але й в інших місцях концентрації напруження.

Для оцінки надійності деталі необхідно враховувати напружений стан в усіх місцях високої концентрації напружень.

Важливою задачею з оцінки надійності деталі є вивчення величини запасу статичної міцності в різних конструктивних концентраторах напружень. Розрахунок запасу статичної міцності зводиться до зіставлення максимального напруження, яке виникає в місцях його концентрації, з межею текучості в якості нормативної величини, що регламентується.

$$n = \frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_{max}}$$

де, n - запас статичної міцності; $\sigma_{0.2}$ - межа плинності, МПа; σ_{max} - максимальне напруження в місці виміру, МПа.

Дані результатів розрахунку запасів статичної міцності при застосуванні для виготовлення деталей «Диск» та «Моноколесо» з різних матеріалів і технологій показані в таблиці 5.3.

Таблиця 5.3

Статичний запас міцності при використанні різних матеріалів

МАТЕРІАЛ / ДЕТАЛЬ	МІСЦЕ ВИМІРУ							
	1		2		3		4	
	σ_{max} , МПа	n	σ_{max} , МПа	n	σ_{max} , МПа	n	σ_{max} , МПа	n
ДИСК								
BT 8	255,2	1,92	249,4	1,57	183,2	2,52	171,1	2,69
OX45-3ODS (СЛС)	347,3	1,41	338,5	1,17	240,5	1,94	254,6	1,84
OX45-3ODS (SLS)+AB	241,3	2,06	217,4	1,82	179,4	2,57	174,5	2,68
МОНОКОЛЕСО								
INCONEL 718	162,2	3,48	191,1	2,51	374,9	1,51	305,0	1,57
INCONEL 718 (СЛС)	188,2	3,0	248,6	1,93	410,0	1,38	376,9	1,27
INCONEL 718 (СЛС)+AB	155,9	3,62	172,4	2,78	369,5	1,53	291,8	1,64

Застосування селективного лазерного спікання для виготовлення деталей ГТД призводить до зниження запасу статичної міцності в різних конструктивних концентраторах напружень. Проте подальше алмазного вигладжування місць концентрації напружень дозволяє значно підвищити запас статичної міцності та повернути його в допустимі межі регламентовані нормативами.

5.2. Аналіз економічної ефективності застосування селективного лазерного спікання та алмазного вигладжування при виробництві деталей ГТД літальних апаратів

Як вже говорилося раніше одним з чинників, що заважає широкому впровадженню адитивних технологій є уявна висока величина первинних капітальних вкладень у виробництво, проте украй мало даних, що підтверджують це на конкретних прикладах.

Тому була виконана оцінка ефективності та раціональності застосування технології СЛС на прикладі виготовлення деталі «Диск» із порошкового матеріалу INCONEL 718 і його подальшого зміцнення алмазним вигладжуванням місць концентрації напружень. Для цього виконано розрахунок економічного ефекту та величини необхідних капітальних вкладень для реалізації вказаних технологій в умовах серійного виробництва.

У традиційну технологію виготовлення деталі диск входить: отримання заготовки одним з методів штампування, велика кількість операцій обробки різанням та велика кількість допоміжних операцій. Альтернативна технологія набагато коротша та полягає в наступному: СЛС деталі; пост обробка різанням.

Порівняння двох технологій виробництва заданої деталі показано на рис. 5.3.



Рис.5.3. Порівняння традиційної та альтернативної технологій отримання диска ГТД літального апарату

Менша кількість металообробного устаткування знижує потребу у виробничих площах. Знижується необхідна кількість устаткування для виробництва заданої деталі згідно з програмою випуску. Так, для базового технологічного процесу потрібні 20 верстатів, не рахуючи заготівельне і допоміжне устаткування. Для альтернативного процесу потрібно всього 10 одиниць устаткування.

Альтернативний технологічний процес і його відмінність від базового показано на рис. 5.4. Однією з особливостей пропонованого технологічного процесу є те, що зміцнення алмазним вигладжуванням місць концентрації напружень виконується на оброблювальному центрі на останньому технологічному переході обробки деталі.

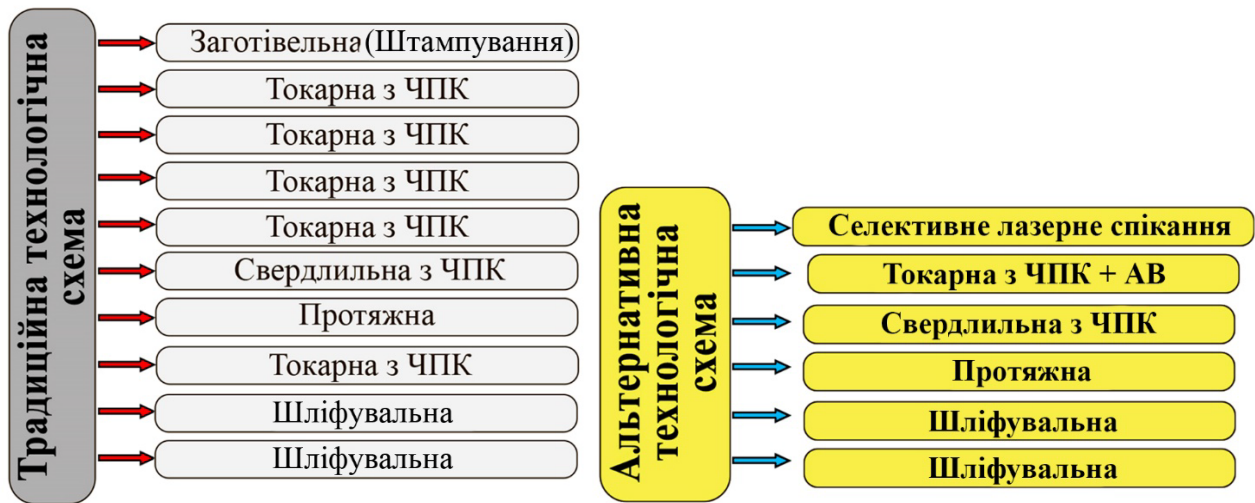


Рис. 5.4. Порівняння традиційної технології виробництва деталі «Диск» з альтернативною

Економічний ефект розраховували виходячи з порівняння собівартості виготовлення однієї деталі, зробленої за альтернативною технологією з базовою, а також необхідних капітальних вкладень для обох варіантів виготовлення. Вартість напівфабрикатів для базового методу отримання заготовки та порошку для селективного лазерного спікання бралася згідно з роздрібними цінами на момент розрахунку.

Оцінка економічного ефекту виконувалася на підставі розрахунку собівартості та величини капітальних вкладень для традиційної і альтернативної технології виробництва деталі «Диск» в умовах серійного виробництва при програмі випуску 1000 шт. Розрахунок техніко-економічних показників виготовлення деталі «Диск» виконували з урахуванням вартості устаткування, оснащення, інструменту, витрат електричної та інших видів енергії (табл. 5.4).

Техніко-економічні показники виготовлення деталі «Диск»

Стаття витрат	Базовий варіант		Альтернативний варіант	
	Всього, грн	На од., грн	Всього, грн	На од., грн
Капітальні вкладення	25105241,25		24386902,87	
Основні матеріали	4142110	4142,11	6771500	6771,5
Основна заробітна плата основних робітників	655210	655,21	355030	355,03
Додаткова ЗП основних робітників	262084	262,084	142012	14,01
Нарахування на заробітну плату	201804,68	201,804	173254,64	173,25
Витрати на зміст і експлуатацію устаткування	32211473,62	32211473,62	11452364,68	11452,36
Собівартість	37472682,3	37472,68	18766150	18766,15
Витрати на реалізацію	374726,82	374,73	1876615	187,66
Загальна собівартість	37847409,12	37847,41	18953810	18953,81
Прибуток 25%	9461852,28	9461,85	4738452,5	4738,45
Відпускна ціна	47309261,4	47309,26	23692262,5	23692,26
ПДВ 20%	9461852,28	9461,85	4738452,5	4738,45
Ціна реалізації	56771113,68	56771,11	28430712,5	28430,7
	На одиницю продукції		На програму випуску	
Економічний ефект	28340,41		28340410	

Дані розрахунку техніко-економічних показників (табл. 5.4), показали, що альтернативна технологія дозволить значно знизити витрати на виробництво

досліджуваної деталі. Так собівартість виробництва однієї деталі з урахуванням витрат реалізації за базовою технологією становить 56771,11грн, а за альтернативною – 28430,7грн. Встановлено, що необхідні капітальні вкладення для впровадження альтернативної технології (24386902,87 грн.) менші ніж витрати, при застосуванні базової технології (25105241,25 грн.). Економічний ефект від впровадження технології селективного лазерного спікання та зміцнення місць концентрації напруги алмазним випрасовуванням при виготовленні деталі «Диск» в умовах серійного виробництва склав 28340,41 грн. на одиницю продукції.

Вартість установки для селективного лазерного сплаву DMP FACTORY 500 становить 6750000 грн, що значно вище за вартість середнього верстата з ЧПК, використовуваного у базовому технологічному процесі, проте за рахунок значного зниження кількості устаткування капітальні вкладення, необхідні для реалізації вказаного технологічного процесу, порівняно з базовим також набагато менші. Разом з технічними і економічними ефектами альтернативна технологія дозволяє отримати позитивні екологічні і соціальні ефекти. Пропонований технологічний процес виготовлення деталі «Диск» робить великий вплив на соціальну сферу виробництва, оскільки з одного боку знижує вимоги до кваліфікації і кількості необхідного персоналу, з іншого боку підвищує вимоги до їх спеціалізації. Виробництво досліджуваної деталі за альтернативною технологією значно знижує негативний вплив виробництва на екологію. Знижується кількість відходів після механічної обробки, які потім необхідно переробити або утилізувати. На альтернативну технологію потрібно менше електроенергії, а значить її потрібно менше виробляти. Ця технологія вимагає значно менше необхідності у виробничих площах, що також позитивно впливає на екологію [118].

5.3. Висновки

Детальний аналіз застосування селективного лазерного спікання та зміцнення алмазним вигладжуванням місць концентрації напружень під час

виробництва деталей ГТД літальних апаратів дозволив оцінити вплив зазначених технологій на технічну, економічну, екологічну та соціальну сферу.

Вивчено вплив АВ місць концентрації напружень на зміну запасу статичної міцності при використанні сплавів на основі алюмініду титану OX45-3ODS та INCONEL 718. Застосування селективного лазерного спікання для виготовлення деталей ГТД призводить до зниження запасу статичної міцності в різних конструктивних концентраторах напружень. Проте подальше алмазного вигладжування місць концентрації напружень дозволяє значно підвищити запас статичної міцності та повернути його в допустимі межі регламентовані нормативами.

Встановлено, що собівартість виготовлення деталі «Диск» за базовим технологічним процесом складає 56771,11 грн, а за альтернативним 28430,7 грн. Необхідні капітальні вкладення для впровадження альтернативної технології складають 24386902,87 грн., що значно нижче ніж витрати при застосуванні базової технології (25105241,25 грн).

Економічний ефект від впровадження технології селективного лазерного спікання та зміцнення місць концентрації напруги алмазним вигладжуванням при виготовленні деталі «Диск» в умовах серійного виробництва склав 28340,41 грн. на одиницю продукції.

Матеріали розділу опубліковані в роботі: [118].

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У завершеній дисертаційній роботі вирішене актуальне науково-прикладне завдання – підвищення якості деталей газотурбінних двигунів, отриманих селективним лазерним спіканням, шляхом алмазного вигладжування.

Результати роботи дозволяють зробити такі основні висновки:

1. У результаті виконаного літературного аналізу впливу конструктивних концентраторів напружень на якість деталей ГТД літальних апаратів встановлено, що найбільшу концентрацію напружень викликають концентратори типу «поверхня поєднання двох діаметрів» та «поверхня переходу отвору у площину». Теоретичний коефіцієнт концентрації напружень зазначених поверхонь у декілька разів перевищує значення для інших поверхонь.

2. Встановлено, що основними проблемами, які заважають розповсюдженню адитивних технологій у виробництві, є пористість, вартість порошку, рівномірність, чутливість до концентрації напружень, якість поверхневого шару. Для розширення сфери застосування адитивних технологій в авіаційній та космічній галузі використовуються такі методи пост-обробки, як поверхневе пластичне деформування. Визначено, що основними напрямками підвищення якості деталей, отриманих селективним лазерним спіканням, є застосування алмазного вигладжування для локальної пластичної деформації місць концентрації напружень.

3. Визначена раціональна геометрія алмазного вигладжувача. Для зміцнення конструктивних концентраторів напружень деталей ГТД літальних апаратів необхідно використовувати алмазний вигладжувач з кутом конусу державки 75° . Розроблено оригінальний пристрій, що дозволяє виконувати алмазне вигладжування поверхонь конструктивного концентратора напружень типу «поверхня поєднання двох діаметрів», який забезпечує постійну силу вигладжування під час обробки в усіх точках поверхні. Розроблено оригінальний пристрій, що дозволяє виконувати алмазне вигладжування «поверхні переходу

отвору у площину». Розроблено оригінальний пристрій, що дозволяє виконувати алмазне вигладжування площинних поверхонь на верстатах з числовим програмним керуванням.

4. Адаптовано методику визначення залишкових напружень методом зондувального отвору для застосування на поверхнях деталей газотурбінних двигунів. Встановлено, що на точність визначення величини напружень суттєво впливають такі фактори, як ретельність позиціонування свердла відносно площини деталі, температура, фактична глибина свердління на кожному кроці, час витримки на кожній глибині, частота та час опитування датчиків тощо.

5. Встановлено вплив режимних параметрів алмазного вигладжування на формування характеристик якості поверхні, ступеня деформаційного зміцнення, розподілу залишкових напружень, опору втомі при обробці деталей зі сплаву ЭП609–Ш. Визначені раціональні режимні параметри алмазного вигладжування конструктивних концентраторів типу «поверхня поєднання двох діаметрів»: зусилля вигладжування 300 Н, подача 0,07 мм/об, швидкість вигладжування 92 м/хв. Визначені раціональні режимні параметри алмазного вигладжування конструктивних концентраторів типу «поверхня переходу отвору у площину»: зусилля вигладжування 30 Н, подача 0,05 мм/об, швидкість вигладжування 4,71 м/хв.

6. Визначені основні закономірності формування параметрів якості обробленої поверхні та поверхневого шару залежно від параметрів алмазного вигладжувача для деталей, отриманих селективним лазерним спіканням, зі сплаву на основі алюмінідів титану ОХ45–3ОДС та жароміцного нікелевого сплаву INCONEL 718. Встановлено, що раціональними режимними параметрами алмазного вигладжування поверхні зразків зі сплаву на основі алюмініда титану ОХ45–3ОДС є вигладжування із зусиллям 300 Н, подачею 0,1 мм/об, алмазним вигладжувачем радіусом 2,5 мм. Встановлено, що на шорсткість і ступінь деформаційного зміцнення поверхневого шару зразків зі сплаву INCONEL 718 режимні параметри алмазного вигладжування мають різний вплив. Доцільним їх поєднанням, при якому ступінь деформаційного зміцнення і шорсткість є

раціональними, є обробка із зусиллям вигладжування 250 Н, подачею 0,1 мм/об, радіусом сфери алмазного вигладжувача 2,5 мм.

7. Встановлено вплив технологічних особливостей обробки та режимних параметрів алмазного вигладжування на параметри пористості. Визначено, що найбільш значимим параметром при дослідженні ефективності застосування алмазного вигладжування для зміцнення матеріалів, отриманих селективним лазерним спіканням, є залишкова пористість. Значний вплив на її величину має початкова пористість, яка може змінюватись в значних межах та розподіл якої має випадковий характер. Встановлено, що алмазне вигладжування ефективно застосовувати для ущільнення поверхневого шару виробів з порошкових матеріалів, на прикладі сплаву на основі алюмініда титану OX45–3ODS. Мінімальні значення залишкової пористості були досягнуті при алмазному вигладжуванні з режимними параметрами: зусилля 0,2...0,3 кН, подача 0,12...0,15 мм/об та радіус сфери алмазного вигладжувача 2,5 мм.

8. На основі проведених досліджень розроблені технологічні рекомендації щодо застосування алмазного вигладжування у промисловому виробництві при обробці деталей ГТД літальних апаратів, отриманих селективним лазерним спіканням.

9. Встановлено, що очікуваний економічний ефект від впровадження запропонованої технології селективного лазерного спікання та зміцнення місць концентрації напружень алмазним вигладжуванням при виготовленні деталі типу «диск» в умовах серійного виробництва склав 28340,41 грн. на одиницю продукції.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- 1 Гапонова О. П., Будник А. Ф. Сталі та сплави з особливими властивостями : навч. посіб. Суми : Сумський державний університет, 2014. 240 с.
- 2 Авиационные материалы : справочник : В 9 т. Москва : ОНТИ, 1973. Т. 3 : Жаропрочные стали и сплавы. Сплавы на основе тугоплавких металлов. Часть I. Деформируемые жаропрочные стали и сплавы / Под общ. ред. А. Т. Туманова. 565 с.
- 3 Масленков С. Б. Жаропрочные стали и сплавы : справочное издание. Москва : Металлургия, 1983. 192 с.
- 4 Сурков О. С., Кондратьев А. И., Алексеев В. П., Хаймович А. И. Исследование обрабатываемости жаропрочной стали 10X11H23T3MP-BД для деталей газотурбинных двигателей // *Вестник СГАУ*. Самара, 2014. № 5-3(47). С. 106 – 112.
- 5 Артамонов Е.В., Васильев Д.В., Чернышов М.О. Стружкодробление при автоматизированной обработке резанием труднообрабатываемых сталей путем комплексного применения стружколомающего инструмента и высокотемпературного охрупчивания // *Известия Юго-Западного государственного университета*. Курск, 2020. № 24(1). С. 8 – 22.
- 6 Твердохлебов А. С., Максимов Ю. В., Верещака А. С. Повышение эффективности твердосплавного инструмента для резания труднообрабатываемых материалов // *Известия Московского государственного технического университета*. Москва, 2014. №2 . С. 94 – 99.
- 7 Верещака А. С., Дачева А. В., & Аникеев А. И. Повышение работоспособности режущего инструмента при обработке труднообрабатываемых материалов путем комплексного применения наноструктурированного износостойкого покрытия и твердого сплава оптимального состава // *Известия Московского государственного технического университета*. Москва, 2010. № 1, С. 99 – 106.

8 Моргунов А. П., Чумаков А. П., Рогачев Е. А. Оптимизация процесса токарной обработки поверхностей изделий из жаропрочных хромоникелевых сплавов // *Омский научный вестник*. Омск, 2014. №3 (133), С. 67 – 70.

9 Ивченко Т. Г., Петряева И. А., Михайлов А. Н. Повышение эффективности сверления труднообрабатываемых материалов за счет использования СОТС // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. Тула, 2018. №4, С. 162 – 168.

10 SF34, vicinity Sydney Australia, 2017 URL https://www.skybrary.aero/index.php/SF34,_vicinity_Sydney_Australia,_2017 (Дата звернення: 31.05.2022)

11 Bhaumik S. K., Sujata M., Venkataswamy M. A. Fatigue failure of aircraft components // *Engineering Failure Analysis*. 2008. Т. 15. №. 6. С. 675 – 694.

12 Торбило В.М. Алмазное выглаживание. Москва : Машиностроение, 1972. 105 с.

13 Петерсон Р. Э. Коэффициенты концентрации напряжений: Графики и формулы для расчета конструктивных элементов на прочность. Москва : Мир, 1977. 302 с.

14 Вишнепольский Е.В. Повышение прочностных характеристик поверхности сопряжения отверстия и тонкостенного вала газотурбинного двигателя // Тези доповідей Десятої Всеукраїнської молодіжної науково-технічної конференції «Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї – наука - виробництво». (м. Суми, 26 – 30 жовтня 2010 р). Суми: СумДУ, 2010. С. 19 – 21.

15 Вишнепольский Е.В., Дядя С.І. Проблемы формирования поверхности отверстий на валах ГТД под последующее алмазное выглаживания // Тези доповідей XIV Всеукраїнської молодіжної науково-технічної конференції «Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї – наука - виробництво». (м. Суми, 27 – 31 жовтня 2014 р). Суми: СумДУ, 2014. С. 18 – 19.

16 Вишнепольский Е.В., Мышекоп А.С. Снижение влияния конструктивных концентраторов напряжений на сопротивление усталости тонкостенных валов ГТД // Материалы конференции VII международной научно-

технической конференции молодых ученых «Проблемы энергосбережения и механизации в горнометаллургическом комплексе». (м. Кривой рог, 26 апреля 2011 г). Кривой рог: Криворожский технический университет, 2011. С. 153 – 155.

17 Вишнепольский С.В., Богуслаев В.А., Гликсон И.Л. Упрочнение кромок отверстий валов ГТД алмазным выглаживанием // Тезисы докладов международной молодежной научно-технической конференции «Молодежь в авиации: новые решения и перспективные технологии». (м. Алушта, 15 – 18 мая 2007 г). Алушта: АО «Мотор Сич», 2007. С. 180 – 182.

18 Жернаков В. С., Мардимасова Т. Н., Арсланов М. Р. Влияние конструктивно-технологических факторов на величину остаточных напряжений при упрочнении отверстий. *Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета*. Уфа, 2011. № 15 (4). С. 90 – 94.

19 Заруцкий А. В. Анализ остаточных напряжений после упрочнения отверстия методом барьерного обжатия // *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии*. Харків, 2013. № 60. С. 85 – 92.

20 Довгалев А. М. Адаптивное управление качеством обработки при совмещенном магнитно-вибродинамическом упрочнении // *Вестник Белорусско-Российского университета*. Могилев, 2016. № 2 (51). С. 15 – 23.

21 Вакулюк В. С., Кирпичёв В. А., Павлов В. Ф., Сазанов В. П. Остаточные напряжения в образцах с отверстиями, имитирующими отверстия под стяжные болты в диске турбины ГТД // *Вестник СГАУ*. Самара, 2011. № 3-3. С. 304 – 308.

22 Сухинин В.П., Волькович И.Б., Лукина Э.В. Концентрация напряжений возле наклонных отверстий в цилиндрической оболочке // *Проблемы прочности*. Киев, 1979. №3. С. 20 – 22.

23 Вишнепольский Е.В. Применение алмазного выглаживания для обработки материалов различных классов // Тезисы докладов XI Международные молодежные научно-технические чтения им. А.Ф. Можайского. (г. Запорожье, 14 – 17 мая 2018 г.) Запорожье: АО «Мотор Сич», 2018. С. 172 – 174.

24 Повышение несущей способности деталей машин алмазным выглаживанием / В.К. Яценко и др. – Москва : Машиностроение, 1985. 232 с.

25 Антонюк Ф. И., Калмыков В. В., Федоров В. А. Влияние шероховатости исходной поверхности на силу алмазного выглаживания // *Машиностроение и компьютерные технологии*, Москва, 2014. № 12. № 171 – 180.

26 Абразивная и алмазная обработка материалов : справочник / под ред. А.Н. Резникова. Москва : Машиностроение, 1977. 391 с.

27 Лихобабина Н. В., Королев, А. А. Упрочнение поверхностей алмазным выглаживанием // *Вестник Саратовского государственного технического университета*. Саратов, 2008. № 1(1). С. 17 – 24.

28 Титов В. А., Лавренко И. Г., Лавриненков А. Д., Савчинский И. Г. Особенности выглаживания титановых сплавов с использованием металлосодержащих смазок // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. Тула, 2014. № 5. С. 65 – 76.

29 Хрульков В. А., Головань А. Я., Федотов А. И. Алмазные инструменты в прецизионном приборостроении. Москва : Машиностроение, 1977. 224 с.

30 Папшев Д.Д. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием. Москва : Машиностроение, 1978. 152 с.

31 Altıparmak S. C., Xiao B. A market assessment of additive manufacturing potential for the aerospace industry. *Journal of Manufacturing Processes*. 2021. Т. 68. С. 728 – 738.

32 Смирнов В.В., Шайхутдинова Е.Ф. Внедрение аддитивных технологий изготовления деталей в серийное авиадвигателестроительное производство // *Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики «АНТЭ-2013»: международная научно-техническая конференция* (Казань 19 – 21 ноября 2013 г.: сборник докладов. – Казань: Изд-во КГТУ, 2013. С. 114 – 119.

33 Манохин А.И., Шорников М.Х. Развитие порошковой металлургии. Москва : Наука, 1988. 77 с.

34 Назаров А.П., Окунькова А.А. Типовые образцы изделий, получаемых методом селективного лазерного спекания // *Вестник Саратовского государственного технического университета*. Саратов, 2012. №3(67). С 76 – 83.

35 Магеррамова Л. А., и д. р. Перспективы применения аддитивных технологий для создания деталей и узлов авиационных газотурбинных двигателей и прямоточных воздушно-реактивных двигателей // *Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение*. Самара, 2019. № 18(3). С. 81 – 98.

36 Леоненков А.Д., Двирный В.В. Перспективы применения аддитивных технологий в аэрокосмической отрасли // *Решетневские чтения*. Красноярск, 2017. № 21-2. С. 632 – 633.

37 Кудряшов В. А., Лапышев А. А. Создание аддитивных технологий с учетом усталостного поведения материала в авиационном инжиниринге // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. Самара, 2018. № 20(4-3). С. 406 – 413.

38 Лесовик В.С., и д. р. Современные трехмерные технологии и факторы сдерживающие их // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. Белгород, 2016. № 12. С. 22 – 30.

39 Shoichi K., et al. Effect of harmonic structure design with bimodal grain size distribution on near-threshold fatigue crack propagation in Ti-6Al-4V alloy. *Kei Ameyama b International Journal of Fatigue*. 2016. Vol. 92. P. 616 – 622.

40 Павленко Д.В. Оценка газонасыщения спеченных титановых сплавов, синтезируемых из порошков с применением винтовой экструзии // *Порошковая металлургия*. Київ, 2017. №5/6. С. 46 – 59.

41 Васильев Б. Е., Магеррамова Л. А. Анализ возможности применения топологической оптимизации при проектировании неохлаждаемых рабочих лопаток турбин // *Вестник СГАУ*. Самара, 2015. №14 (3-1). С. 139 – 147.

42 Павленко Д. В. Закономерности уплотнения титановых прессовок // *Вестник двигателестроения*. Запорожье, 2018. № 1. С. 107 – 116.

43 Материалы для аддитивного производства. URL: <https://3d-daily.ru/technology/additive-manufacturing-materials.html>

44 Liu R., et al. Aerospace applications of laser additive manufacturing. *Laser Additive Manufacturing Materials, Design, Technologies, and Applications Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials*. 2017. pp. 351 – 371.

45 Belova O. V. Prospects of application of additive technologies for increasing the efficiency of impeller machines. *AIP Conference proceedings*. 2017. vol. 1876. pp. 1 – 7.

46 Hendrixson S. Lower Buy-to-Fly Ratios with Near-Net Additive Manufacturing. URL: <https://www.mmsonline.com/blog/post/lower-buy-to-fly-ratios-with-near-net-additive-manufacturing>

47 Султанова Ф.Р., Нам И.Э., Мирзахакимов С.Б. Технология селективного лазерного спекания (SLS) // *Инновационная наука*. Уфа, 2016. №10-2. С. 119 – 121.

48 DMP Factory 500 Solution. URL <https://www.3dsystems.com/3d-printers/dmp-factory-500>

49 Куликовский Р. А., Пахолка С. Н., Павленко Д. В. Перспективы промышленного применения алюминидов титана в авиадвигателестроении // *Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Серия : Стародубовские чтения*. Днепр, 2015. Вып. 80. С. 369 – 372.

50 Sames W. Additive Manufacturing of Inconel 718 using Electron Beam Melting: Processing, Post-Processing, & Mechanical Properties. *Doctoral dissertation, Texas A & M University*, 25.05.01. Texas, 2015. pp. 339.

51 Wang X., Keya T., Chou K. Build Height Effect on the Inconel 718 Parts Fabricated by Selective Laser Melting. *Procedia Manufacturing*. 2016. vol. 5. pp. 1006 – 1017.

52 Denny J. et al. Fatigue crack propagation behaviour of inconel 718 structures built using directed energy deposition based laser additive manufacturing. *Materials Letters*. 2020. T. 276. C. 128241.

53 Каблов Е.Н., Лукин В.И. Интерметаллиды на основе титана и никеля для изделий новой техники // *Автоматическая сварка*. Київ, 2008. №11. С. 76 – 82.

54 Педаш А. А., Лысенко Н. А., Клочихин В. В., Шило В. Г. Структура и свойства образцов из сплава Inconel 718 полученных по технологии селективного лазерного плавления // *Авиационно-космическая техника и технология*. Харків, 2017. № 8. С. 46 – 54.

55 Каблов Е.Н. Интерметаллиды на основе титана и никеля для изделий новой техники // *Автоматическая сварка*. Киев, 2008. №11. С. 76 – 82.

56 Ханькова Е. В., Степанов С. И., Логинов Ю. Н., Корелин А. В. Остаточная пористость в титановых имплантатах, полученных аддитивными технологиями // Материалы XVIII Международной научно-технической Уральской школы-семинара металлургов-молодых ученых (Екатеринбург, 21-23 ноября 2017.) Екатеринбург : УрФУ, 2017. С. 375-378.

57 Kenel C., et al. Microstructure and oxide particle stability in a novel ODS γ -TiAl alloy processed by spark plasma sintering and laser additive manufacturing. *Intermetallics*. 2017. vol. 90. pp. 63 – 73.

58 Lin W. S. et al. Additive manufacturing technology (direct metal laser sintering) as a novel approach to fabricate functionally graded titanium implants: preliminary investigation of fabrication parameters. *The international journal of oral & maxillofacial implants*. 2013. vol. 28, no. 6. pp. 1490 – 1495.

59 Кривилев М. Д., Харанжевский Е. В., Гордеев, Г. А., Анкудинов, В. Е. Управление лазерным спеканием металлических порошковых смесей. *Управление большими системами: сборник трудов* // Москва, 2010. № 31. С. 299 – 322.

60 Hoshiyama Y. et al. Rapidly solidified titanium aluminide-based composite deposits with dispersed nitride particles produced by reactive plasma spraying. *Journal of the Japan Institute of Metals*. 2002. vol. 66. pp. 784 – 791.

61 Неруш С. В., Евгенов А. Г. Исследование мелкодисперсного металлического порошка жаропрочного сплава марки ЭП648-ВИ применительно к лазерной lmd-наплавке, а также оценка качества наплавки порошкового материала на никелевой основе на рабочие лопатки ТВД // *Труды ВИАМ*. Москва, 2014. № 3.

62 Алишин М.И., Князев А.Е. Производство металлопорошковых композиций высокой чистоты титановых сплавов методом индукционной газовой атомизации для аддитивных технологий // *Труды ВИАМ*. Москва, 2017. № 11(59).

63 McCracken C. G., Barbis D. P., Deeter R. C. Key characteristics of hydride – dehydride titanium powder. *Powder Metallurgy*. 2011. vol. 54:3. pp. 180 – 183.

64 Ольшанецкий В. Е., Овчинников А. В., Джуган А. А. Возможность использования несферических титановых порошков для аддитивных технологий // *Актуальные проблемы в машиностроении*. Новосибирск, 2016. № 3. С. 82 – 87.

65 Dahms M. J., Seeger W., Smarsly B., Wildhag Titanium-aluminides by hot isostatic pressing of cold extruded titanium-aluminium powder mixtures. *ISIJ International*. 1991. vol. 31. no. 10. pp. 1093 – 1099.

66 Kothari K., Radhakrishnan R., Wereley N. M. Advances in gamma titanium aluminides and their manufacturing techniques. *Progress in Aerospace Sciences*. 2012. vol. 55. pp. 1 – 16.

67 Ran G., Zhou J., Wang Q. G. The effect of hot isostatic pressing on the microstructure and tensile properties of an unmodified A356-T6 cast aluminum alloy. *Journal of alloys and compounds*. 2006. vol. 421. pp. 80 – 86.

68 Педаш А. А., и др. Влияние технологий изготовления металлических порошков на структуру и свойства деталей, полученных селективным лазерным плавлением // *Вестник двигателестроения*. Запорожье, 2019. № 2. С. 31 – 39.

69 Педаш А. А., Ключихин В. В., Митина Т. А., Шило В. Г. Влияние типа источника энергии при 3D прынтинге на структуру и свойства деталей из сплава Ti–6Al–4V // *Современная электрометаллургия*. 2018. № 3(132).

70 Appel F., Oehring M., Wagner R. Novel design concepts for gamma-base titanium aluminide alloys. *Intermetallics*. 2000. vol. 8. pp. 1283 – 1312.

71 Beygelzimer Y. Vortices and mixing in metals during severe plastic deformation. *Materials science forum*. 2011. vol. 683. pp. 213 – 224.

72 Lapovok R., Tomus D., Muddle B. C. Low-temperature compaction of Ti–6Al–4V powder using equal channel angular extrusion with back pressure. *Materials science and engineering: A*. 2008. vol. 490, Issues 1–2. pp 171 – 180.

73 Stolyarov V. V., Beigel'zimer Ya. E., Orlov D. V., Valiev R. Z. Refinement of Microstructure and Mechanical Properties of Titanium Processed by Twist Extrusion and Subsequent Rolling. *The physics of metals and metallography*. 2005. vol. 99, no. 2. pp. 204 – 211.

74 Maleki E. et al. Surface post-treatments for metal additive manufacturing: Progress, challenges, and opportunities. *Additive Manufacturing*. 2021. T. 37. C. 101619.

75 Ghorashi M. S., Farrahi G. H., Movahhedy M. R. Effect of severe shot peening on the fatigue life of the laser-cladded Inconel 718 specimens. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019. T. 104. №. 5. C. 2619 – 2631.

76 Shiyas K. A., Ramanujam R. A review on post processing techniques of additively manufactured metal parts for improving the material properties. *Materials Today: Proceedings*. 2021. T. 46. C. 1429 – 1436.

77 Kaynak Y., Tascioglu E. Post-processing effects on the surface characteristics of Inconel 718 alloy fabricated by selective laser melting additive manufacturing. *Progress in Additive Manufacturing*. 2020. T. 5. №. 2. C. 221 – 234.

78 Lesyk D. A. et al. Post-processing of the Inconel 718 alloy parts fabricated by selective laser melting: Effects of mechanical surface treatments on surface topography, porosity, hardness and residual stress. *Surface and Coatings Technology*. 2020. T. 381. C. 125136.

79 Lesyk D. A. et al. Surface Shot Peening Post-processing of Inconel 718 Alloy Parts Printed by Laser Powder Bed Fusion Additive Manufacturing. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2021. T. 30. №. 9. C. 6982 – 6995.

80 Persenot T. et al. Effect of ultrasonic shot peening on the surface defects of thin struts built by electron beam melting: Consequences on fatigue resistance. *Additive Manufacturing*. 2019. T. 28. C. 821 – 830.

81 Bobrovskij I. N. Burnishing Systems: a Short Survey of the State-of-the-art. *IOP Conf. Series: Materials science and engineering*. 2018. vol. 302. pp. 1 – 6.

82 Nazarova M. N., Palaev A. G. Diagnostics and repair of centrifugal oil transfer pump rotor shaft. *IOP Conf. Series: Earth and environmental science*. 2017. T. 87. vol. 87, Issue 9. pp. 1 – 7.

83 Luis N., et al. Five-axis machining and burnishing of complex parts for the improvement of surface roughness. *Materials and manufacturing processes*. 2011. vol. 26, Issue 8. pp. 997 – 1003.

84 Akkurt A. Comparison of roller burnishing method with other hole surface finishing processes applied on AISI 304 austenitic stainless steel. *Journal of materials engineering and performance*. 2011. vol. 20, Issue 6. pp. 960 – 968.

85 Mantle A.L., Aspinwall D. K. Surface integrity of a high speed milled gamma titanium aluminide. *Journal of materials processing technology*. 2001. vol. 118, Issues 1 – 3. pp 143 – 150.

86 Klocke F. et al. On high-speed turning of a third-generation gamma titanium aluminide. *The international journal of advanced manufacturing technology*. 2013. vol. 65, Issue 1 – 4. pp. 155 – 163.

87 Priarone P. C., Robiglio M., Settineri L., Teb V. Milling and turning of titanium aluminides by using minimum quantity lubrication. *Procedia CIRP*. 2014. vol. 24. pp. 62 – 67.

88 Liu J., Luan Q. D., Wang X. G., Peng, L. M. Microstructural and high temperature deformation characterization of Ti–45Al–3Nb–(Cr, Mn, Mo, Sc) alloy. *Materials Science and Engineering: A*. 2010. № 527(29-30). pp. 7658 – 7662.

89 Maiyar L. M., Ramanujam R., Venkatesan K., Jerald J. Optimization of machining parameters for end milling of Inconel 718 super alloy using Taguchi based grey relational analysis. *Procedia Engineering*. 2013. vol. 64. pp. 1276 – 1282.

90 Dudzinski D., et al. A review of developments towards dry and high speed machining of inconel 718 alloy'. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2004. vol. 44. pp. 439 – 456.

91 Gao D., Hao Z., Han R. Study of cutting deformation in machining nickel-based alloy Inconel 718. *Int J Mach Tool Manu*. 2011. vol. 51(6). pp. 520 – 527.

92 Lesyk D. A., et al. Post-processing of the Inconel 718 alloy parts fabricated by selective laser melting: Effects of mechanical surface treatments on surface topography, porosity, hardness and residual stress. *Surface and Coatings Technology*. 2020. № 381. pp. 125136.

93 Вишнепольский Е.В., Богуслаев В.А., Пухальская Г.В., Гликсон И.Л. Оценка эффективности упрочнения тонкостенных валов алмазным выглаживанием // Тезисы докладов II международной молодежной научно-технической конференции авиамоторостроительной отрасли «Молодежь в авиации: новые решения и перспективные технологии» (м. Алушта, 12-16 мая 2008 г). Алушта: АО «Мотор Сич». 2008. С. 90 – 92.

94 Оправка для алмазного выглаживания складнопрофильных поверхностей: пат. 36340 Украина: МПК (2006) C21D7/00. № 36340; заявл. 29.04.08; опубл. 27.10.08, Бюл. №20. 4 с.

95 Вишнепольский Е.В., Дядя С.І. Устройство для обработки и упрочнения поверхности сопряжения радиального отверстия и вала // Тези доповідей XII Всеукраїнської молодіжної науково-технічної конференції «Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї – наука - виробництво». (м. Київ, 2010 р). Київ: Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», 2012. С. 36 – 37.

96 Вишнепольский Е.В., Дядя С.І. Влияние алмазного выглаживания на макроструктуру поверхностного слоя тонкостенных валов ГТД // Збірник матеріалів Міжнародної науково-технічної конференції «Машинобудування України очима молодих». (м. Кременчук, 2013 р). Кременчук: КрНУ ім. Михайла Остроградського, 2013. С. 45 – 46.

97 Вишнепольский Е.В., Дядя С.І. Методичне забезпечення дослідження процесу обробки радіальних та фланцевих отворів на валах ГТД. Прогресивні технології в машинобудуванні : збірник наукових праць III Всеукраїнської науково-технічної конференції, (м. Львів 2 – 6 лютого 2015 р.) Львів: Національний університет «Львівська політехніка». 2015. – С. 46 – 47.

98 Пристрій для алмазного выглаживания поверхні з'єднання отвору та циліндру: пат. 63243 Украина: МПК (2011) C21D7/00. № 63243; заявл. 01.12.10; опубл. 10.10.11, Бюл. №19. 4 с.

99 ГОСТ 9450-76. Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников. [01.01.1977]. М.: Издательство стандартов, 1993. 35 с.

100 Standard, A. S. T. M. E837-08 Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-drilling Strain-gage Method. ASMT international, 2008. West Conshohocken, PA.

101 Schajer G. S. Measurement of Non-Uniform Residual Stresses Using the Hole-Drilling Method. Part I – Stress Calculation Procedures. *ASME. J. Eng. Mater. Technol.* 1988. № 110(4). pp. 338 – 343.

102 Schajer, G. S. Measurement of Non-Uniform Residual Stresses Using the Hole-Drilling Method. Part II – Practical Application of the Integral Method. *ASME. J. Eng. Mater. Technol.* 1988. № 110(4). pp. 344 – 349.

103 Scafidi M., Valentini E., Zuccarello B. Error and uncertainty analysis of the residual stresses computed by using the hole drilling method. *Strain.* 2011. № 47(4). pp. 301 – 312.

104 Winiarski B., Withers P. J. Micron-scale residual stress measurement by micro-hole drilling and digital image correlation. *Experimental mechanics.* 2012. № 52(4). pp. 417-428.

105 Вишнепольський Є.В., Павленко Д.В., Сідоренко М.В., Писарський А.О. Методологія виміру залишкових напружень методом свердління отворів в тонкостінних складнопрофільних деталях короткоресурсних малорозмірних двигунах літальних апаратів // *Металознавство та обробка металів.* Київ, 2020. №3/58. С.9 – 11.

106 Вишнепольский Е.В., Жеманюк П.Д., Пухальская Г.В., Шанькин С.И., Гликсон И.Л. Снижения влияния концентрации напряжений в цилиндрических оболочках // Тезисы докладов XII международного конгресса двигателестроителей. (м. Рыбачье, 14 – 19 сентября 2007 г). Харьков: Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», 2008. С. 90 – 92.

107 Вишнепольський Є.В., Пухальська Г.В., Гліксон І.Л. Повышение сопротивления усталости мест концентрации напряжений в цилиндрических оболочках алмазным выглаживанием // *Вісник двигунобудування.* Запоріжжя, 2009. №1. С. 90 – 94.

108 Вишнепольський Є.В., Богуслаєв В.А., Пухальська Г.В., Гліксон І.Л. Повышение сопротивления усталости тонкостенных валов // *Вісник двигунобудування*. Запоріжжя, 2007. №2. С. 136 – 141.

109 Kenela C., et al. Microstructure and oxide particle stability in a novel ODS γ -TiAl alloy processed by spark plasma sintering and laser additive manufacturing. *Intermetallics*. 2017. №90. pp. 63 – 73.

110 Pavlenko D.V., Ovchinnikov A. V. Effect of Deformation by the Method of Screw Extrusion on the Structure and Properties of VT1-0 Alloy in Different States. *Materials Science*. 2015. Vol. 51, Issue 1. pp. 52 – 60.

111 Вишнепольський Є.В., Павленко Д.В. Эффективность уплотнения некомпактных сплавов алмазным выглаживанием // *НАУКА и ТЕХНИКА*. Мінськ, 2019. №18(1). С.62 – 89.

112 Вишнепольський Є.В., Павленко Д.В. Формирование качества поверхности деталей из сплава на основе алюминидов титана, полученных по технологии slm алмазным выглаживанием // *Вісник двигунобудування*. Запоріжжя, 2018. №1. С. 123 – 131.

113 Ivasishin O. M. et al. Synthesis of alloy Ti – 6Al – 4V with low residual porosity by a powder metallurgy method. *Powder metallurgy and metal ceramics*. 2002. vol. 41. № 7 – 8. pp. 382 – 390.

114 Вишнепольський Є. В., Павленко Д. В. Алмазне вигладжування деталей з некомпактних сплавів на основі алюмінідів титану // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. Харків, 2020. №3. С. 43 – 52.

115 Sames W. Additive Manufacturing of Inconel 718 using Electron Beam Melting: Processing, Post-Processing, & Mechanical Properties. Doctoral dissertation : 2015-05-01. Texas A & M University, 2015. pp. 339.

116 Wang X., Key T., Chou K. Build Height Effect on the Inconel 718 Parts Fabricated by Selective Laser Melting. *Procedia Manufacturing*. 2016, vol. 5. pp. 1006 – 1017.

117 Vyshnepolskyi Y. et al. Parts Diamond Burnishing Process Regimes Optimization Made of INCONEL 718 Alloy via Selective Laser Sintering Method //2020

IEEE 10th International Conference Nanomaterials: Applications & Properties (NAP). – IEEE, 2020. – С. 02SAMA01 – 1 – 02SAMA01 – 5.

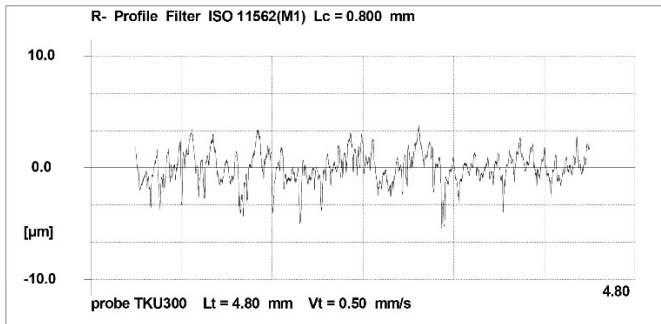
118 Вишнепольский С. В., Павленко Д. В., Двирный Я. В. Прогнозируемые эффекты упрочнения алмазным выглаживанием деталей полученных с помощью селективного лазерного спекания // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. Харків, 2020. №4. С. 43 – 52.

ДОДАТКИ

Додаток В

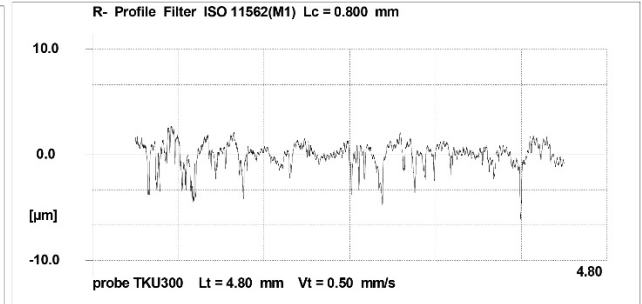
Профілограми поверхонь зразків зі сплаву на основі алюмінію титану
OX75-3ODS

Ra	1.096 μm
Rz	7.753 μm
Rmax	9.268 μm



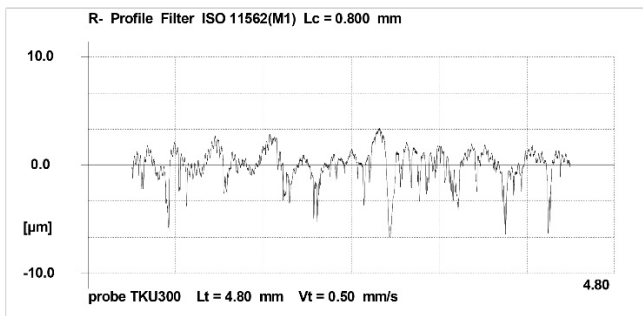
Режим 1

Ra	0.850 μm
Rz	6.667 μm
Rmax	7.919 μm



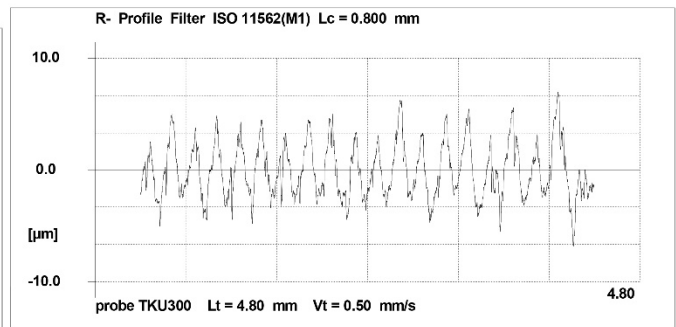
Режим 2

Ra	1.149 μm
Rz	7.982 μm
Rmax	10.162 μm



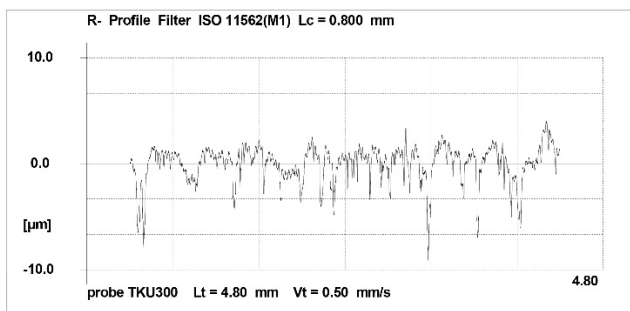
Режим 3

Ra	2.041 μm
Rz	10.975 μm
Rmax	13.795 μm



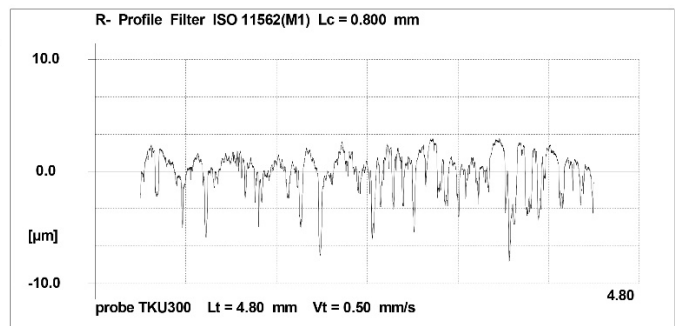
Режим 4

Ra	1.274 μm
Rz	9.446 μm
Rmax	12.697 μm



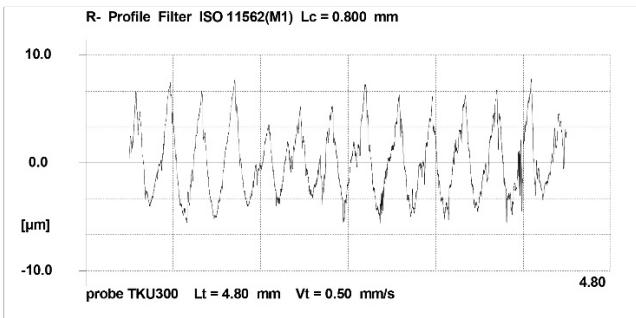
Режим 5

Ra	1.372 μm
Rz	9.166 μm
Rmax	10.691 μm



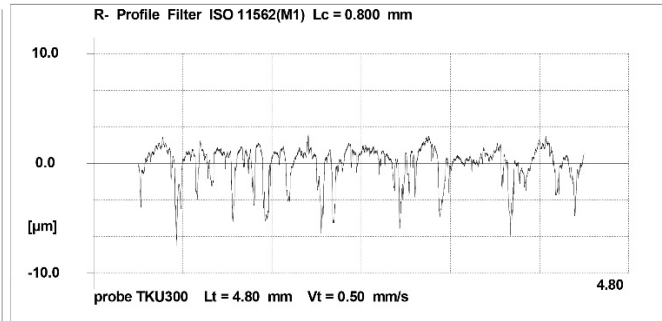
Режим 6

Ra 2.635 μm
 Rz 12.658 μm
 Rmax 13.369 μm



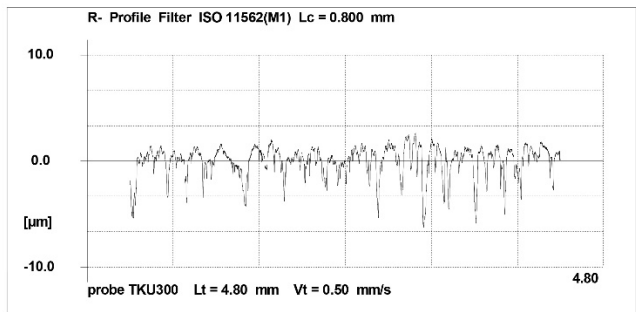
Режим 7

Ra 1.246 μm
 Rz 8.557 μm
 Rmax 9.952 μm



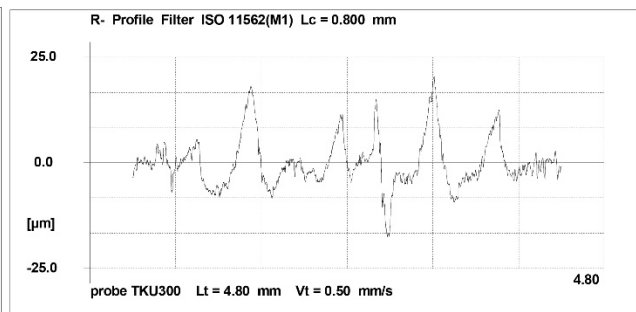
Режим 8

Ra 1.070 μm
 Rz 7.387 μm
 Rmax 8.892 μm



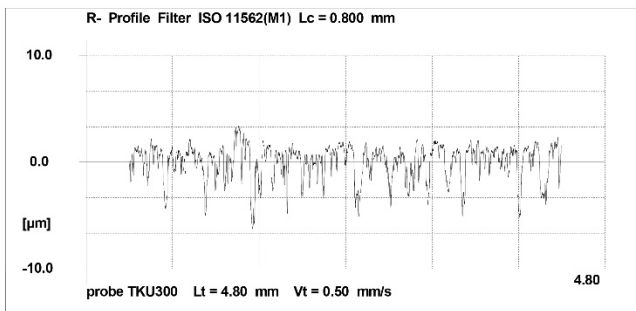
Режим 9

Ra 4.265 μm
 Rz 25.114 μm
 Rmax 35.972 μm



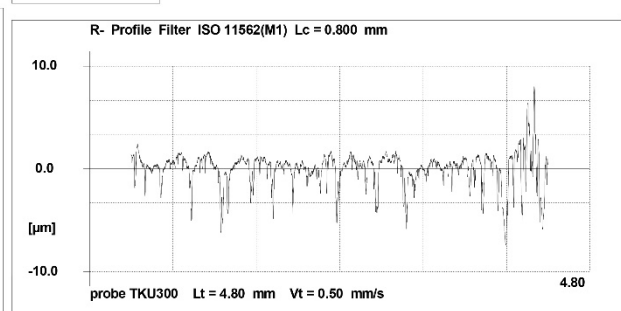
Режим 10

Ra 1.277 μm
 Rz 7.790 μm
 Rmax 9.711 μm



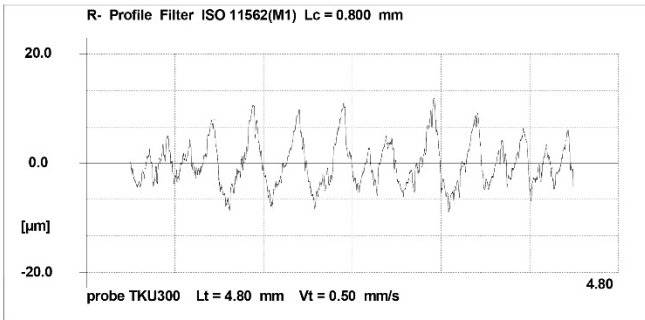
Режим 11

Ra 1.103 μm
 Rz 9.068 μm
 Rmax 15.466 μm



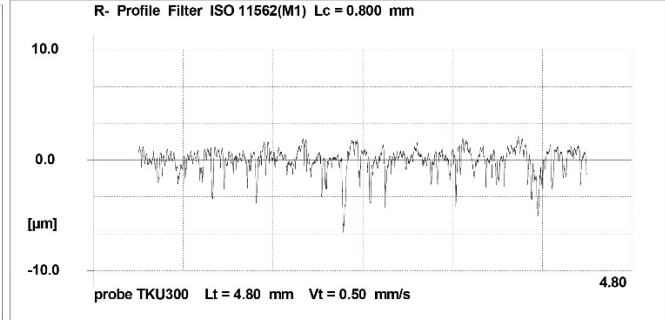
Режим 12

Ra 3.376 μm
 Rz 17.135 μm
 Rmax 21.044 μm



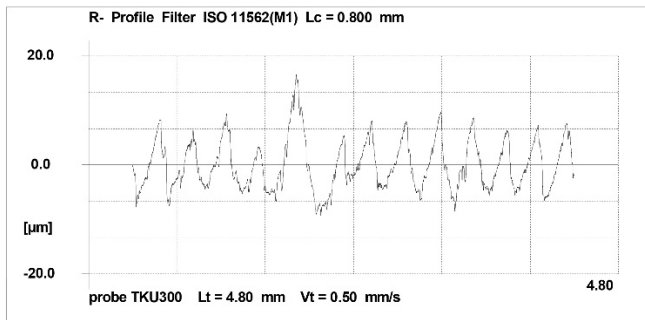
Режим 13

Ra 0.791 μm
 Rz 6.563 μm
 Rmax 8.510 μm



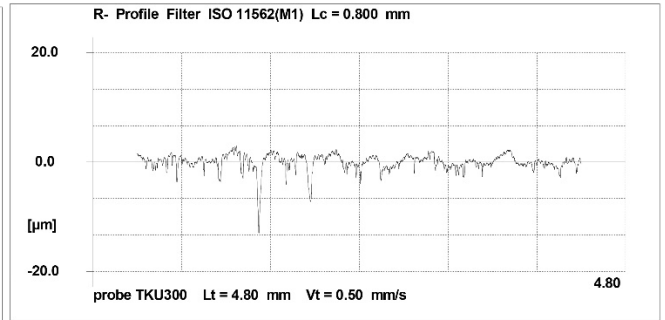
Режим 14

Ra 3.871 μm
 Rz 17.893 μm
 Rmax 23.285 μm



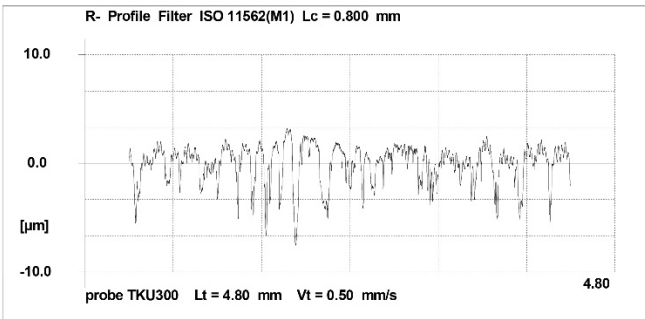
Режим 16

Ra 1.003 μm
 Rz 7.616 μm
 Rmax 16.086 μm



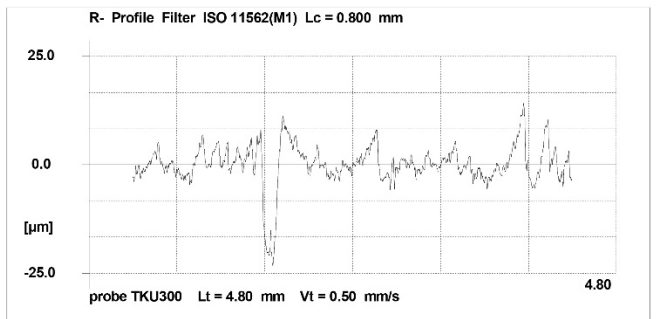
Режим 17

Ra 1.347 μm
 Rz 7.954 μm
 Rmax 10.791 μm



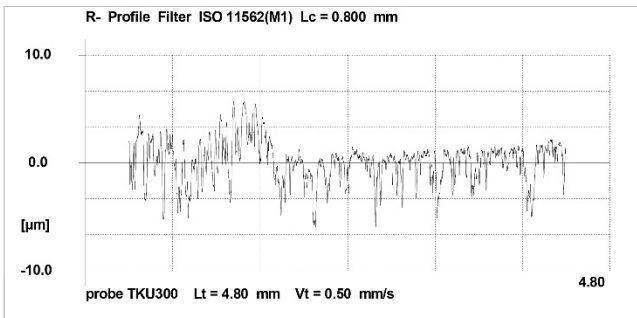
Режим 18

Ra 2.994 μm
 Rz 17.979 μm
 Rmax 34.643 μm



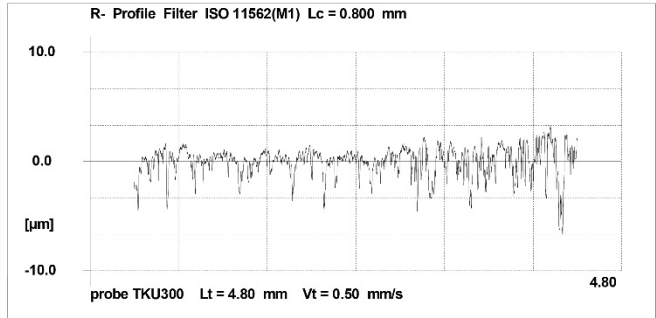
Режим 19

Ra 1.475 μm
 Rz 8.360 μm
 Rmax 10.612 μm



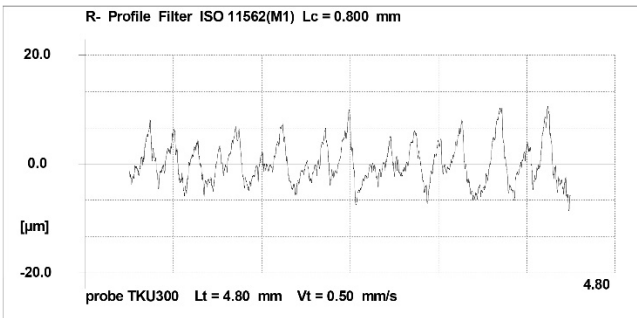
Режим 20

Ra 0.971 μm
 Rz 6.851 μm
 Rmax 9.996 μm



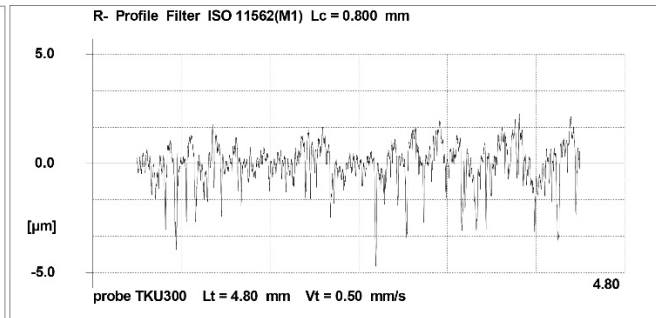
Режим 21

Ra 2.966 μm
 Rz 15.915 μm
 Rmax 19.212 μm



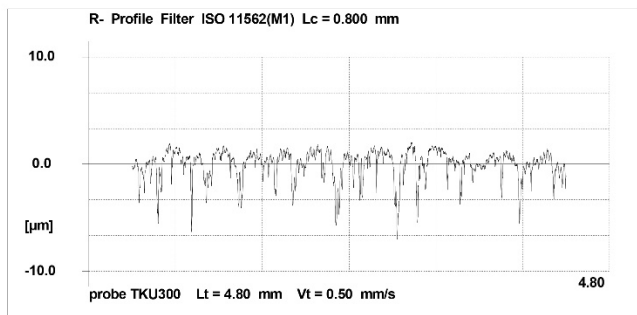
Режим 22

Ra 0.679 μm
 Rz 5.403 μm
 Rmax 6.404 μm



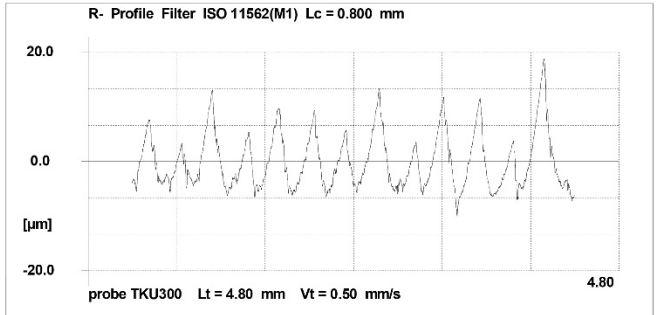
Режим 23

Ra 1.002 μm
 Rz 7.564 μm
 Rmax 9.043 μm



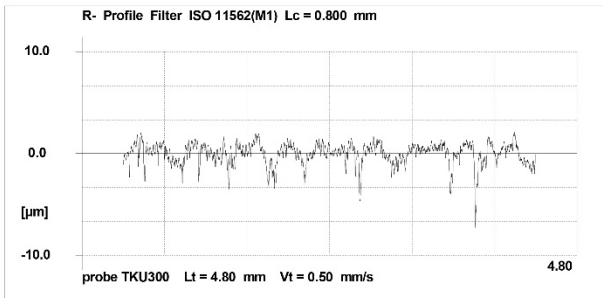
Режим 24

Ra 4.153 μm
 Rz 20.668 μm
 Rmax 26.319 μm



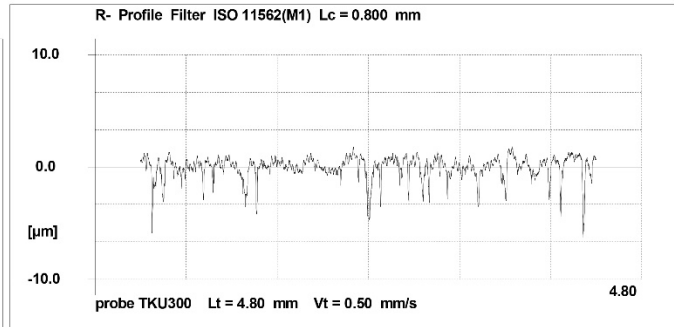
Режим 25

Ra	0.792 μm
Rz	6.390 μm
Rmax	9.387 μm



Режим 26

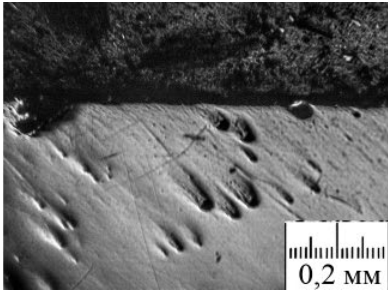
Ra	0.704 μm
Rz	6.464 μm
Rmax	8.094 μm



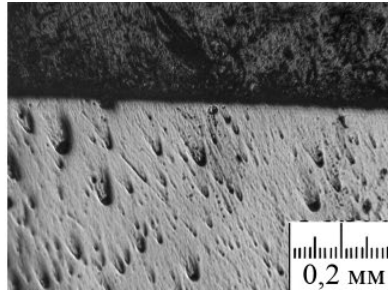
Режим 27

Додаток Г

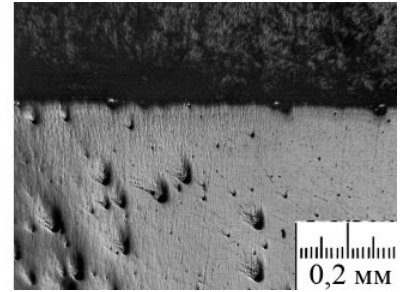
Мікрофотографії шліфів зразків зі сплаву на основі алюмініду титану OX75-3ODS після алмазного вигладжування з різним поєднанням режимних параметрів



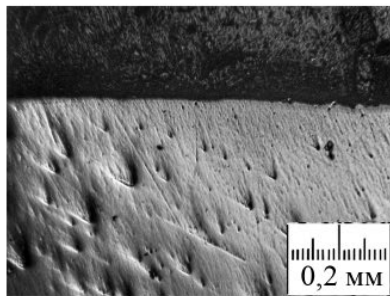
Режим №0



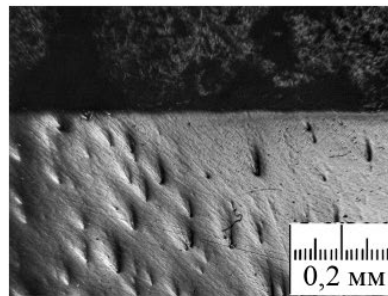
Режим№1



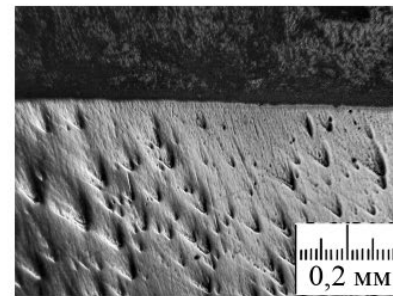
Режим№2



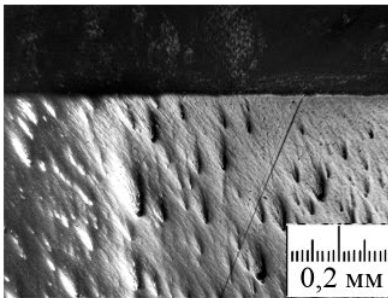
Режим №3



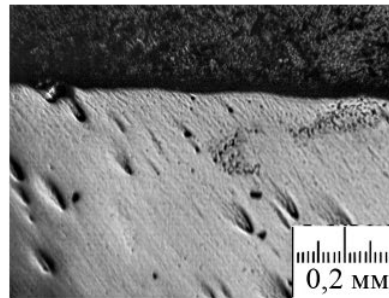
Режим№4



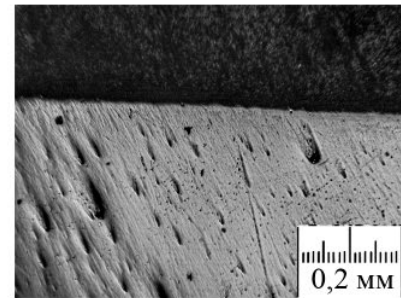
Режим№5



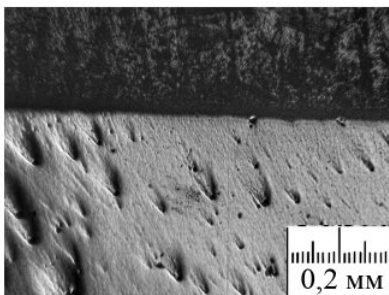
Режим №6



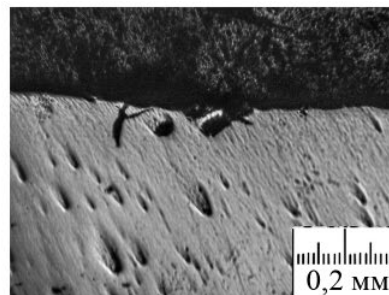
Режим№7



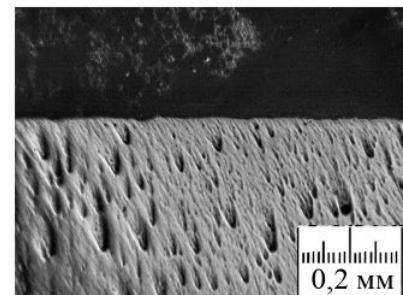
Режим№8



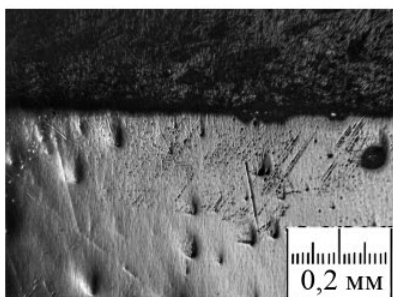
Режим №9



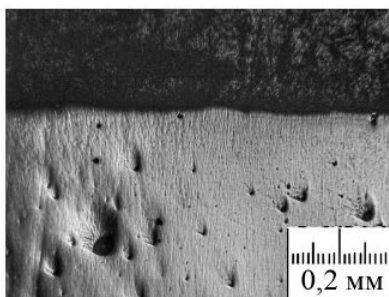
Режим№10



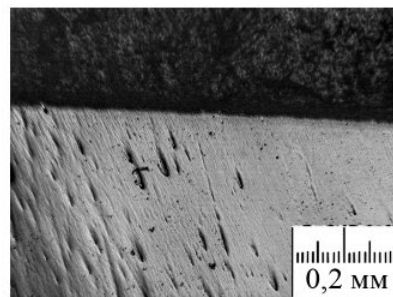
Режим№11



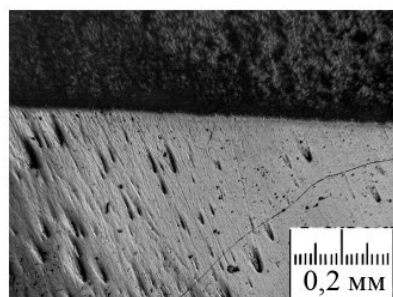
Режим №12



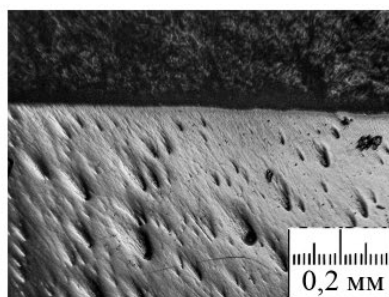
Режим №13



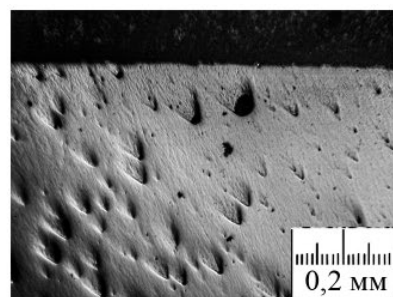
Режим №14



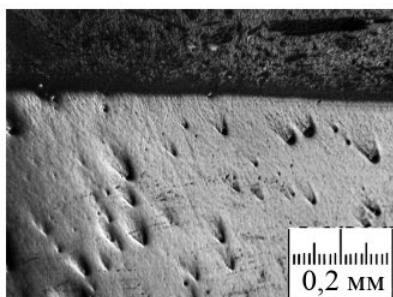
Режим №15



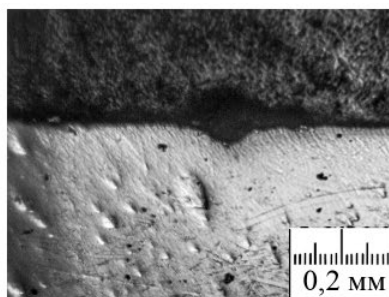
Режим №16



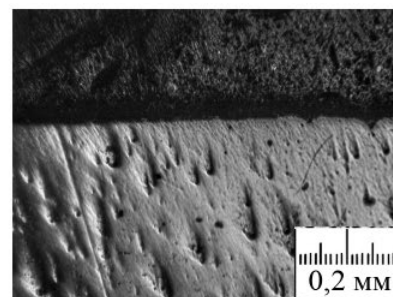
Режим №17



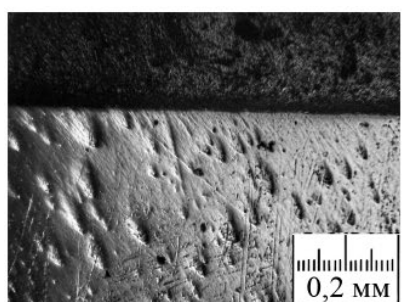
Режим №18



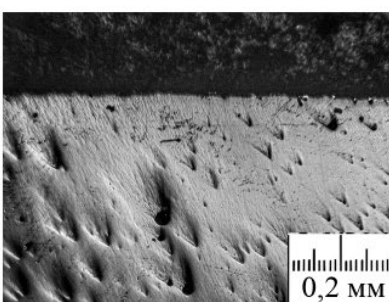
Режим №19



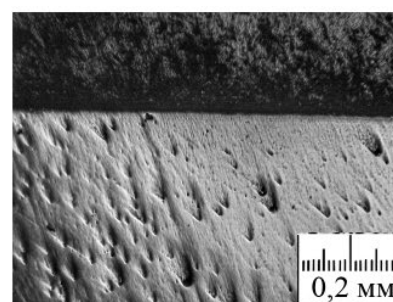
Режим №20



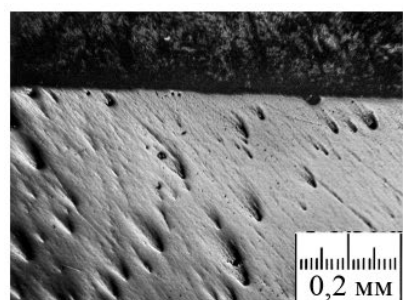
Режим №21



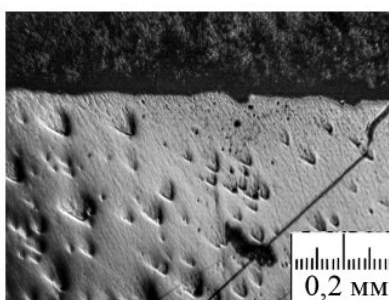
Режим №22



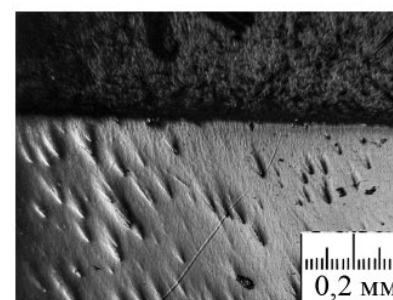
Режим №23



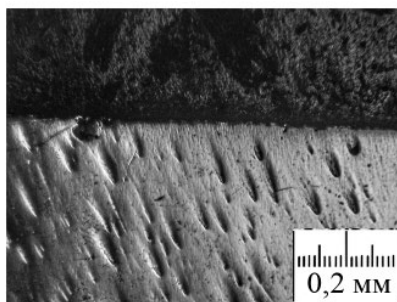
Режим №24



Режим №25



Режим №26



Режим №27