

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

УДК 621.432

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.6\(37\).1.3-8](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.6(37).1.3-8)**А.В. Рутковський**, ст. наук.співр., канд. техн. наук*Інститут проблем міцності ім. Г. С. Писаренко НАН України, м. Київ, Україна**e-mail: coating@ipp.kiev.ua***С.І. Маркович**, доц., канд. техн. наук, **С.С. Михайлюта**, асп.*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна**e-mail: markob0@ukr.net, sergejmihajluta2@gmail.com*

Дослідження напружено-деформованого стану іонноазотованих зразків із покриттям в умовах ізотермічної та термоциклічної повзучості методом кінцево-елементного аналізу

В роботі на основі методу кінцево-елементного аналізу здійснено дослідження напружено - деформованого стану зразка з алюмінієвого сплаву з теплозахисними дифузійними іонноазотованими шарами в умовах ізотермічного та термоциклічного навантаження. Проведено оцінку напружено - деформованого стану алюмінієвого зразка, як без зміцнення, так із теплозахисним дифузійним іонноазотованим поверхневим шаром від одночасного впливу навантаження та температури, а саме в умовах термоциклічної повзучості. Порівняна оцінка напружено-деформованого стану 1/8 зразка з алюмінієвого сплаву AL21 та із зміцненим поверхневим шаром здійснювалася з використанням програмного пакета NASTRAN. Встановлено, що значна частина еквівалентних напружень сприймається зміцненим поверхневим шаром при збереженні несучої здатності основи. Цим підтверджується підвищення опору композиції “основа-покриття” як ізотермічній так і термоциклічній повзучості. Крім того, за допомогою методу кінцево-елементного аналізу можна передбачити роботу деталей циліндропоршнєвої групи, а саме час і місце виникнення тріщини при зміні навантаження та температури.

напружено-деформований стан, метод кінцево-елементного аналізу, основа, покриття, ізотермічна та термоциклічна повзучість

Постановка проблеми. Одним з прогресивних методів підвищення теплової стійкості поршнів двигунів внутрішнього згорання є іонне азотування (іонно-плазмове азотування) [1]. Разом з тим дослідження напружено - деформованого стану зразка з алюмінієвого сплаву з теплозахисними дифузійними іонноазотованими шарами в умовах термоциклічного навантаження (одночасної дії навантаження та температури) є актуальною задачею. При цьому застосування методу кінцево-елементного аналізу надає можливість передбачити роботу деталей циліндропоршнєвої групи, а саме час і місце виникнення тріщини при зміні навантаження та температури [2,3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Метод кінцевих елементів є потужним чисельним методом вирішення найрізноманітніших інженерних задач та має вирішальне місце в прогнозуванні працездатності конструктивних елементів при дії експлуатаційних факторів [4].

В залежності від виду розрахунку, складності задачі та направленості того, чи іншого програмного забезпечення для конкретного розрахунку дослідниками

використовується програмний продукт NASTRAN, який має спільну розрахункову базу на основі методу кінцевих елементів і є однією з програм кінцево-елементного аналізу. Ці програми обумовлені використанням їх для розрахунку складних задач механіки деформованого твердого тіла, задач теплопровідності, теорії коливань та інших специфічних розрахунків таких як розрахунок елементів конструкції на міцність, або оптимізація конструкції за граничними напруженнями та поперечним перетином деталі. При цьому є можливість моделювати практично всі типи матеріалів, включаючи композитні. Оскільки поршні автотракторних двигунів внутрішнього згорання працюють у важких температурних режимах і складних статичних і динамічних умовах навантаження, та мають складні геометричні форми, то для розрахунку напружено-деформованого стану доцільно використовувати програмний комплекс – MSC NASTRAN for WINDOWS [5, 6].

Постановка завдання. На основі методу кінцево-елементного аналізу здійснити дослідження напружено-деформованого стану зразка з алюмінієвого сплаву з теплозахисними дифузійними іонноазотованими шарами в умовах термоциклічного навантаження.

Виклад основного матеріалу. При розрахунку напружено-деформованого стану враховувалися особливості їх геометричних параметрів, властивості конструктивного матеріалу, вид розрахунку (статичний, тепловий, та ін.), та умови силового й температурного навантаження, що діють на них. Розрахунок у роботі проводили з використанням реальних експериментальних зразків.

Методика розрахунку напружено-деформованого стану композиції “основа - покриття” з врахуванням експлуатаційних та технологічних факторів складається з декількох етапів: розв’язування задачі нестационарної теплопровідності для визначення залишкових напружень, які є результатом нанесення покриття; визначення напружень від силового та температурного навантаження; отримання напружено-деформованого стану методом суперпозиції.

З використанням методу кінцево-елементного аналізу проведено оцінку напружено-деформованого стану алюмінієвого зразка, як без зміцнення, так із теплозахисним дифузійним іонноазотованим поверхневим шаром від одночасного впливу навантаження та температури, а саме в умовах термоциклічної повзучості. Для більш точного визначення еквівалентних напружень проведення розрахунків проводилася на 1/8 частині зразка (рис. 1). Порівняна оцінка напружено-деформованого стану 1/8 зразка з алюмінієвого сплаву AL21 та із зміцненим поверхневим шаром здійснювалася з використанням програмного пакета NASTRAN.

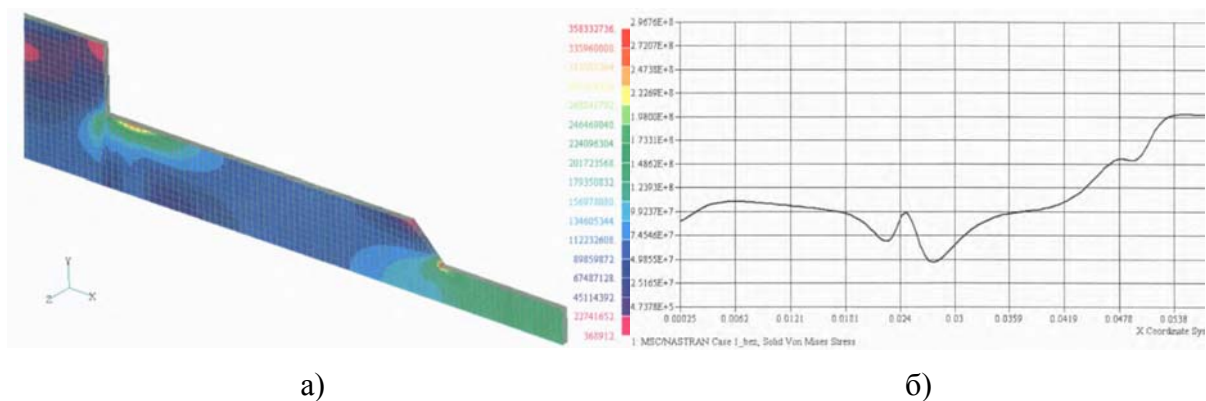


Рисунок 1 – Поля а) та зміна б) еквівалентних напружень в моделі 1/8 зразка без зміцнення в умовах термоциклічного навантаження, Па

Джерело: розроблено авторами

В якості початкових даних застосовувалися фізико-механічні властивості алюмінієвого сплаву АД21 й зміцненого поверхневого шару, основу якого складає AlN [7, 8]: густина матеріалу - $\rho = 3,26 \text{ г/см}^3$; коефіцієнт лінійного розширення - $\alpha_1 = 5 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$; коефіцієнт теплопровідності - $\lambda = 90 \text{ Вт/(м К)}$; питома теплоємність - $c = 850 \text{ Дж/(кг К)}$; модуль Юнга - $E = 3 \cdot 10^{11} \text{ Па}$; модуль зсуву - $G = 1,5 \cdot 10^{11} \text{ Па}$; коефіцієнт Пуассона - $\mu = 0,2$.

Модель напружено-деформованого стану 18 зразка з алюмінієвого сплаву АД21 без зміцнення розбито на кінцеві елементи з полями переміщень у напрямку дії сили, яка прикладена до верхньої частини зразка, при одночасному впливі температури. Модель складається із 12691 вузла та має 10020 елементів. На рисунку 1 представлено поля еквівалентних напружень в цій моделі в умовах термоциклічного навантаження.

В результаті аналізу отриманої моделі та значення напружень по довжині 1/8 зразка спостерігаємо (рис. 2), що максимальні еквівалентні напруження діють в середині робочої ділянки зразка по всій площі поперечного перетину. Це зумовлено значним впливом термічних напружень, так як ця частина зразка підлягає значному впливу температури. Стрибокподібний характер кривої пояснюється збільшенням напруження в місцях можливого виникнення тріщин. Руйнування зразка без зміцнення почнеться при напруженні $1,99 \cdot 10^8 \text{ Па}$.

Модель напружено-деформованого стану 1/8 зразка з алюмінієвого сплаву АД21 із дифузійними іонноазотованими шарами розбито на 10020 кінцевих елементів та 12691 вузла, Елементи що знаходяться на поверхні мають змінний модуль пружності по товщині елемента, починаючи від азотованої поверхні до основного матеріалу.

На початку оцінки встановлено розподіл температури по площі зразка протягом часу нагрівання (рис. 2,а), приклад розподілу температури на 4 с нагрівання) та охолодження (рис. 2,б), приклад розподілу температури на 4 с охолодження) в умовах термоциклічної повзучості.

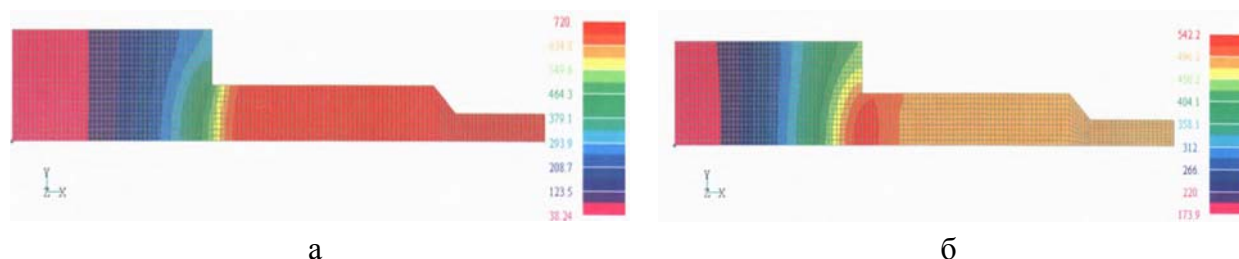


Рисунок 2 – Розподіл температури по площі 18 зразка із зміцненням після 4 с. нагрівання °С а) та охолодження °С б)

Джерело: розроблено авторами

При аналізі моделі зразка після вакуумного азотування у пульсуючому пучку плазми розраховано поля еквівалентних напружень при одночасному впливі навантаження та температури (рис. 3 та рис. 4) в умовах термоциклічної повзучості.

В результаті аналізу отриманої моделі та значень напружень по довжині та поперечному перерізу 1/8 зразка встановлено, що зміцнений поверхневий шар сприймає значні, в порівнянні з основою, еквівалентні напруження від одночасної дії навантаження та температури. Спостерігаємо, що в середній частині зразка (по перетину) значення їх збільшуються від $1,9 \cdot 10^8 \text{ Па}$ в основі, до $10,8 \cdot 10^8 \text{ Па}$ у зміцненому поверхневому шарі. Високі значення еквівалентних напружень у зміцненому шарі, можливо, можна пояснити різним значенням коефіцієнта лінійного розширення алюмінієвого сплаву АД21 та азотованого поверхневого шару.

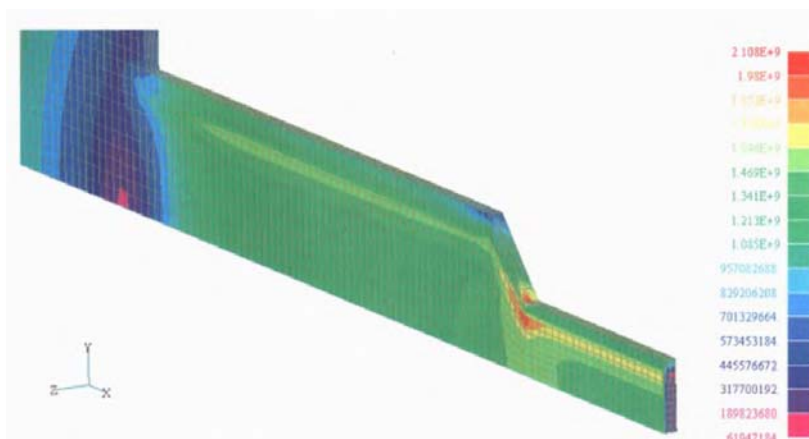


Рисунок 3 – Поля еквівалентних напружень у моделі 1/8 зразка із зміцненням при одночасному впливі навантаження та температури, Па

Джерело: розроблено авторами

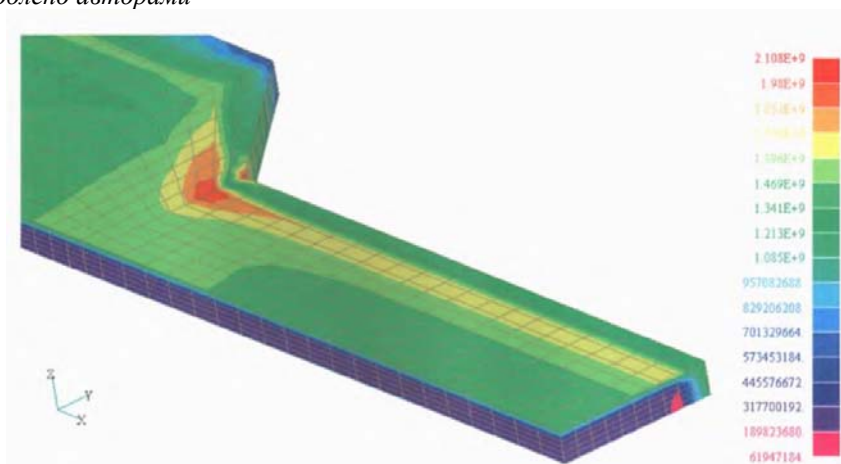


Рисунок 4 – Поля еквівалентних напружень в моделі робочої частини 1/8 зразка із зміцненням в умовах термоциклічної повзучості, Па.

Джерело: розроблено авторами

На рис. 5,а та рису. 5,б представлено характер зміни еквівалентних напружень в основі та у зміцненому поверхневому шарі по всій довжині 1/8 частини зразка.

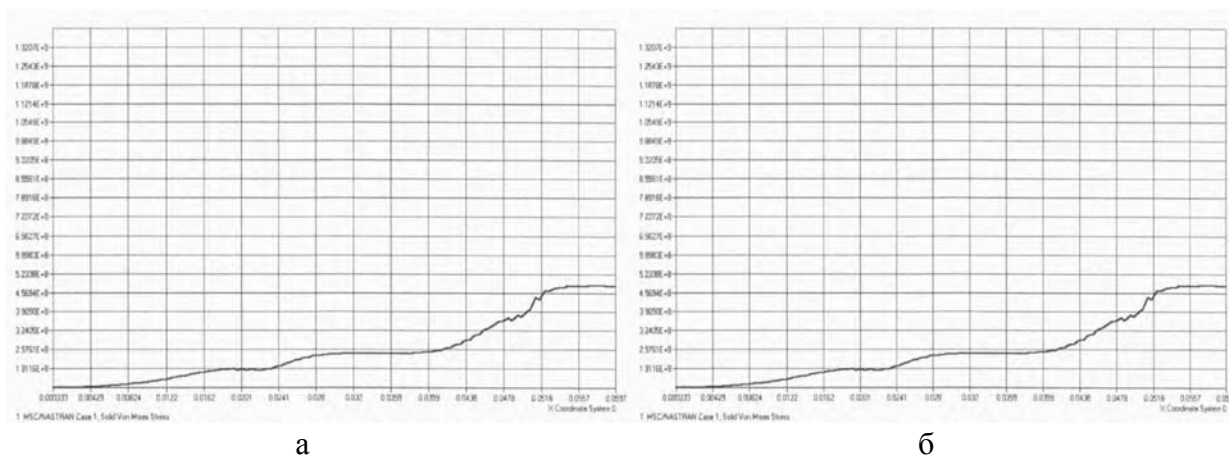


Рисунок 5 – Зміна напружень в основі а) та зміцненого зразка б) по довжині 1/8 зразка при одночасному впливі навантаження та температури

Джерело: розроблено авторами

Спостерігаємо, що в місці виникнення тріщини збільшується величина еквівалентних напружень у іонноазотованому шарі і при значенні більше $1,09 \cdot 10^9$ Па проходить руйнування зразка в умовах термоциклічного навантаження. Тобто, зміцнений зразок може витримати в 1,5 рази більші еквівалентні напруження ніж без зміцнення.

Висновок. Таким чином, на основі проведеного аналізу напружено-деформованого стану зразка з алюмінієвого сплаву з теплозахисними дифузійними іонноазотованими шарами в умовах термоциклічного навантаження (одночасної дії навантаження та температури) встановлено, що значна частина еквівалентних напружень сприймається зміцненим поверхневим шаром при збереженні несучої здатності основи. Цим підтверджується підвищення опору композиції “основа-покриття” як ізотермічній так і термоциклічній повзучості. Крім того, за допомогою методу кінцево-елементного аналізу можна передбачити роботу деталей циліндропоршньової групи, а саме час і місце виникнення тріщини при зміні навантаження та температури.

Список літератури

1. Ляшенко Б.А., Маркович С.І., Михайлюта С.С. Розробка технологічного процесу вакуумного азотування поршнів двигунів в пульсуючому пучку плазми . *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. . 2017. Вип. 47, ч. 1. С. 158-166.
2. Рутковський А.В., Маркович С.І., Михайлюта С.С. Теплостійкість іонноазотованих алюмінієвих сплавів при ізотермічному та термоциклічному впливі . *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2020. Вип. 3(34). С. 72-81.
3. Мірненко В.І., Рутковський А.В., Зенкін М.А. Автоматизована система контролю та управління дослідженням ізотермічної та термоциклічної повзучості . *Технологические системы*. 2004. №3. С. 69-72.
4. Расчеты машиностроительных конструкций методом конечных элементов / В.И. Мяченков и др. М.: Машиностроение, 1989. 576 с.
5. Шимкович Д.Г. Расчет конструкций в MSC. visualNastran for Windows. М.: ДМК Пресс, 2004. 704 с.
6. Шимкович Д.Г. Расчет конструкций MSC/NASTRAN for Windows. М.: ДМК Пресс, 2001. 448 с.
7. Костюк Г.И. Физико-технические основы нанесения покрытий, ионной имплантации и ионного легирования, лазерной обработки и упрочнения, комбинированных технологий. Книга 1: Физические процессы плазменно-ионных, ионно-лучевых, плазменных, светолучевых и комбинированных технологий. Х.: АННУ, 2002. 588 с.
8. Костюк Г.И. Физико-технические основы нанесения покрытий, ионной имплантации и ионного легирования, лазерной обработки и упрочнения, комбинированных технологий. Книга 2: Справочник для расчета основных физических и технологических параметров оценки возможностей и выбора типа технологий и оборудования. Х.: АННУ, 2002. 442 с.

Referencis

1. Liashenko, B.A., Markovych, S.I. & Mykhajliuta, S.S. (2017). Rozrobka tekhnolohichnoho protsesu vakuumnoho azotuvannia porshniv dyvuhuniv v pul'suiuchomu puchku plazmy [Development of the Technological Process of Vacuum Nitriding of Engine Pistons in the Pulsating Plasma Beam]. *Konstrujuvannja, vyrobnyctvo ta ekspluatacija sil'skohospodars'kyx mashyn – Design, manufacture and operation of agricultural machinery, Issue 47, part 1*, 158-166 [in Ukrainian].
2. Rutkovs'kyj, A.V. Markovych, S.I. & Mykhajliuta, S.S. (2020). Teplostijkist' ionnoazotovanykh aliuminiievych splaviv pry izotermichnomu ta termotsyklichnomu vplyvi [] . *Tsentral'noukrains'kyj naukovyj visnyk. Tekhnichni nauky – Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences, Issue 3(34)*. 72-81 [in Ukrainian].
3. Mirnenko, V.I. Rutkovs'kyj, A.V. & Zenkin, M.A. (2004). Avtomatyzovana systema kontroliu ta upravlinnia doslidzhenniam izotermichnoi ta termotsyklichnoi povzuchosti [Automated system of control and management of research of isothermal and thermocyclic creep]. *Tekhnolohyckeskye systemy – Technological systems*, 3, 69-72 [in Ukrainian].

4. Mjachenkov, V.I., Mal'cev, V.P., Majboroda, V.P. et al. (1989). *Raschety mashinostroitel'nyh konstrukcij metodom konechnih zlementov [Calculations of machine-building structures by the finite element method]*. Moskow: Mashinostroenie [in Russian].
5. Shimkovich, D.G. (2004). *Raschet konstrukcij v MSC. visualNastran for Windows. [Structural analysis in MSC. VisualNastran for Windows.]*. Moskow: DMK Press [in Russian].
6. Shimkovich, D.G. (2001). *Raschet konstrukcij MSC/NASTRAN for Windows. [Calculation of structures. MSC/NASTRAN for Windows.]*. Moskow: DMK Press [in Russian].
7. Kostjuk, G.I. (2002). *Fiziko-tehnicheskie osnovy nanesenija pokrytij, ionnoj implantacii i ionnogo legirovanija, lazernoj obrabotki i uprochnenija, kombinirovannyh tehnologij. Kniga 1: Fizicheskie processy plazmenno-ionnyh, ionno-luchevyih, plazmennyh, svetoluchevyih i kombinirovannyh tehnologij. [Physical and technical bases of coating, ion implantation and ion doping, laser processing and hardening, combined technologies. Book 1: Physical processes of plasma-ion, ion-beam, plasma, light-beam and combined technologies].* Kh.: ANNU [in Russian].
8. Kostjuk, G.I. (2002). *Fiziko-tehnicheskie osnovy nanesenija pokrytij, ionnoj implantacii i ionnogo legirovanija, lazernoj obrabotki i uprochnenija, kombinirovannyh tehnologij. Kniga 2: Spravochnik dlja rascheta osnovnyh fizicheskikh i tehnologicheskikh parametrov ocenki vozmozhnostej i vybora tipa tehnologij i oborudovanija. [Physical and technical bases of coating, ion implantation and ion doping, laser processing and hardening, combined technologies. Book 2: Handbook for calculating the main physical and technological parameters for assessing the possibilities and choosing the type of technologies and equipment]*. Kh.: ANNU [in Russian].

Anatoly Rutkovskiy, PhD tech. sci., Senior Researcher

National Academy of sciences of Ukraine G.S. Pisarenko institute for problems of strength, Kyiv, Ukraine

Sergiy Markovych, Assos. Prof., PhD tech. sci, **Sergiy Myhajlyta**, post-graduate

Central Ukrainian National Technical University, Kropivnitskiy, Ukraine

Investigation of the Stress-strain State of Ion-nitrogen-coated Specimens Under Conditions of Isothermal and Thermocyclic Creep by Finite Element Analysis

One of the advanced methods of increasing the thermal stability of the pistons of internal combustion engines is ionic nitriding (ion-plasma nitriding). At the same time, the study of the stress - strain state of a sample of aluminum alloy with heat - protective diffusion ion - nitrided layers under conditions of thermocyclic loading (simultaneous action of load and temperature) is an urgent task. The application of the finite element analysis method makes it possible to predict the operation of the parts of the cylinder-piston group, namely the time and place of the crack when the load and temperature change.

When calculating the stress-strain state, the peculiarities of their geometric parameters, properties of structural material, type of calculation (static, thermal, etc.), and conditions of force and temperature load acting on them were taken into account. The calculation was performed using real experimental samples. The method of calculating the stress-strain state of the composition "base - coating" taking into account operational and technological factors consists of several stages: solving the problem of non-stationary thermal conductivity to determine the residual stresses resulting from coating; determination of stresses from power and temperature load; obtaining the stress-strain state by the method of superposition. Using the finite element analysis method, the stress-strain state of the aluminum sample was evaluated, both without hardening and with a heat-protective diffusion ion-nitrided surface layer from simultaneous exposure to load and temperature, namely under conditions of thermocyclic creep. To more accurately determine the equivalent stresses, the calculations were performed on 1/8 of the sample. Comparative evaluation of the stress-strain state of 1/8 of the sample of aluminum alloy AL21 and with a reinforced surface layer was performed using the software package NASTR.

Thus, based on the analysis of the stress - strain state of the aluminum alloy sample with heat - protective diffusion ion - nitrided layers under thermocyclic loading (simultaneous action of load and temperature) it is established that a significant part of equivalent stresses is perceived by the strengthened surface layer. This confirms the increase in the resistance of the composition "base-coating" of both isothermal and thermocyclic creep. In addition, with the help of the finite element analysis method, it is possible to predict the operation of the parts of the cylinder-piston group, namely the time and place of the crack when the load and temperature change.

stress-strain state, method of finite-element analysis, base, coating, isothermal and thermocyclic creep

Одержано (Received) 16.04.2022

Прорецензовано (Reviewed) 25.04.2022

Прийнято до друку (Approved) 26.09.2022