

Mityayev O. A., Petrashev O.S., Kapustian O.Ye.

HEREDITARY MODIFICATION OF SECONDARY ALUMINUM ALLOYS

The low cost of aluminum casting alloys causes high interest in the search for new methods of processing. The use of well-known methods of controlling the structure and properties of aluminum alloy castings does not always provide the required quality of parts made from secondary raw materials due to the negative impact of the charge and iron impurities. The purpose of the research is to improve the mechanical properties of secondary aluminum casting alloys and develop a new resource-saving technology for their recycling. The material for this study was the AK7ch alloy and its analogue A356.2. Part of the charge was processed into a fine-crystalline remelt by pouring liquid metal with a temperature of 720 °C into water at a temperature of 20 °C. Experimental melting with different composition of the initial charge, different treatment with a modifying complex and different iron concentration was carried out in an electric resistance furnace. The study of the structure and control of mechanical properties was carried out on samples after heat treatment in the T6 mode. The conducted studies have shown that the complex application of modifying treatment and fine-crystalline remelting (MK-1 up to 0.1% and MKP up to 45% in the composition) can significantly increase the mechanical properties of secondary aluminum alloys AK7ch and A356.2 ($\sigma_v > 300$ MPa, $\delta > 5\%$ and HRB > 50). The dependences of the tensile strength, relative elongation and hardness on the amount of modifying complex and fine-crystalline remelting in the initial charge were obtained. The obtained results allow the application of complex technology for processing secondary raw materials to obtain high-quality castings in industrial conditions. The use of charge materials with a favorable hereditary structure allows reducing the amount of modifying additives used, which in turn significantly reduces gas emissions and improves the environmental situation in the foundry.

Keywords: aluminum; intermetallic phases; structure; heredity; recycling; modifying treatment.

Стаття надійшла 12.05.2025р.

УДК 669.14.018.24

doi.org/10.31498/2522-9990292025330226

Сидоренко М.В., Фролов Р.О., Єманов М.В., Капустян О.Є.

ПЕРСПЕКТИВНІ МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ КОНТАКТНОЇ ВИТРИВАЛОСТІ СТАЛІ ЕІ-347Ш

Вальницькі машин нового покоління стають все більш складними виробами, до яких пред'являються високі вимоги щодо забезпечення контактної витривалості, у тому числі при підвищеній температурі. Для підвищення контактної витривалості застосовують поверхневе пластичне деформування (ППД). Одним з перспективних напрямків ППД є зміцнення мікрокульками. Більшість робіт не враховує вплив температури на контактну витривалість деталей після ППД. Метою роботи є підвищення контактної витривалості сталі ЕІ-347Ш за рахунок раціоналізації режимів зміцнення мікрокульками та скляними кульками. Випробування на контактну втому проводилися на установках МКВ-Т при температурах 20 °C і 300 °C. Всі зразки перед зміцненням піддавалися поліруванню. Для цього було спеціально розроблено пристосування, яке забезпечувало постійний тиск на зразок при

Машинобудування і зварювальне виробництво

поліруванні. Визначення залишкових напружень проводили методом свердління глухого отвору на зразках свідках. Для визначення впливу тиску робочої рідини на контактну витривалість були проведені випробування чотирьох партій зразків: в початковому стані і зміцнених на протязі 3-х хвилин при тиску робочої рідини 0,16; 0,2; 0,25 МПа відповідно. Розглянуті режими зміцнення призводять до збільшення шорсткості в порівнянні з поліруванням приблизно на один квалітет. Найменша зміна шорсткості спостерігається при тиску робочої рідини 0,2 МПа. Глибина зміцненого шару на всіх режимах знаходиться в межах 0,08 ... 0,1 мм. При тиску робочої рідини 0,16 МПа спостерігалось зниження мікротвердості, яке пов'язане з нестійкістю процесу і нерівномірністю зміцнення. Визначені середнелогарифмічна довговічність та гарантована довговічність; побудовані прямі, що апроксимують функції розподілу логарифмів кількості циклів. Встановлено, що найбільша довговічність зразків має місце при зміцненні скляними кульками при тиску робочої рідини 0,3 МПа, що обумовлено сприятливим поєднанням величини залишкових напружень, наклепу, мікротвердості, які отримані при мінімальному збільшенні шорсткості. Встановлено закономірності впливу режимів зміцнення мікрокульками та скляними кульками на контактну витривалість сталі EI-347Ш. Застосовані більш сучасні методики випробувань. Визначено параметри зміцнення зразків зі сталі EI-347Ш мікрокульками та скляними кульками, які забезпечують підвищення довговічності при контактному навантаженні. Це дозволить раціонально призначати режими ППД при проектуванні вальниць для перспективних газотурбінних двигунів. Удосконалено методику випробувань, що дозволило підвищити достовірність отриманих результатів.

Ключові слова: вальниці, контактна витривалість, залишкові напруження, довговічність, зміцнення мікрокульками, скляні кульки.

Постановка проблеми. Вальниці машин нового покоління стають більш складними виробами, до яких висувають високі вимоги щодо забезпечення контактної витривалості, зокрема при роботі в умовах підвищеної температури. Сучасні тенденції спрямовані на створення вальниць інтегрованих у конструкцію двигуна, гібридних опор, освоєння нових теплостійких сталей, удосконалення технології фінішної обробки [1-4]. Однак розроблені методи фінішної обробки не завжди дають змогу досягти бажаної ефективності та продуктивності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для підвищення контактної витривалості деталей вальниць часто застосовується поверхневе пластичне деформування (ППД) [5], [10], [12], [13]. Для тонкостінних вальницевих кілець, хороші результати забезпечує ультразвукове зміцнення [9]. Одним із перспективних напрямків ППД є зміцнення мікрокульками [2], [7], [8]. Водночас більшість робіт з контактної витривалості вальницевих сталей не враховує вплив температури на довговічність деталей після ППД [6], [11], [13].

Мета дослідження. Метою роботи є підвищення контактної витривалості сталі EI-347Ш за рахунок вибору раціональних параметрів гідродробоструменевого зміцнення мікрокульками.

Основний матеріал дослідження. Випробуванням піддавалися зразки зі сталі EI-347Ш (8X4B9Ф2-Ш) виготовлені за ТУ 14-1-2244-2005, хімічний склад якої наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Хімічний склад сталі EI-347Ш

Вміст елементів, %								
Fe	C	Si	Mn	Cr	Ni	W	Mo	V
основа	0,78	0,26	0,27	4,57	0,15	8,64	0,25	1,55

Машинобудування і зварювальне виробництво

Термообробку зразків проводили за стандартною технологією для сталей цього класу: загартування з охолодженням в мастило при 20 °С і триразове відпускання при температурі 560 °С. Для досліджень відібрано зразки з твердістю після термообробки HRC 63...64. Твердість контролювали за допомогою ТК-2. Усі зразки перед зміцненням піддавалися поліруванню. Для цього було спеціально розроблено пристосування, яке забезпечувало постійний тиск на зразок під час полірування. Поверхнєве пластичне деформування здійснювалося способом гідродробоструменевого зміцнення сталевими і скляними мікрокульками діаметром 50...150 мкм. Час гідроструменевої обробки варіювався від 1,5...9 хв.

У зв'язку з необхідністю проведення випробувань за температури 300 °С змащування зразків проводили синтетичним мастилом ВТ-301 (ТУ 38.101657-85).

Випробування на контактну втому проводили на установках МКВ-Т за температур 20 °С і 300 °С. Схема випробування полягає в обкатці випробуваного зразка між двома циліндричними випробувальними дисками. Така схема випробувань для вальницьових сталей застосовується Pratt & Whitney [5].

Застаріла система керування дослідних стендів МКВ-Т, що містила в собі ламповий підсилювач сигналу з досить низькою чутливістю, була замінена на новий електронний блок керування, побудований на основі сучасного мікроконтролера Atmega 2560.

Застосування мікроконтролера дозволило нам значно зменшити розміри блоку керування, при цьому спростити використання існуючих функцій та додати нові, а саме:

- автоматизувати механізми навантаження та розвантаження за допомогою крокового двигуна;
- вести журнал (файл), в якому фіксуються події та результати дослідження (інформація отримана від датчиків) в хронологічній послідовності;
- забезпечити плавний пуск електродвигуна, через частотний перетворювач, який керується тим самим мікроконтролером;
- більш точний контроль температури зразка за допомогою хромель-алюмелевої термопари.

Мікроконтролер може вимкнути машину при руйнуванні зразка та дозволяє проводити дослідження за змінною циклограмою навантаження, або змінною частотою обертання зразка.

Режим випробувань: максимальні контактні напруги - 4000 МПа, частота обертання зразка - 29000 хв⁻¹. Для запобігання можливого проковзування було встановлено систему контролю частоти обертання ведучого і веденого натискних дисків лазерними тахометрами.

Визначення залишкових напружень проводили методом свердління глухого отвору [6] на зразках свідках на базі системи MTS3000-Restan [10]. Висока частота обертання алмазного свердла (300000 хв⁻¹) дає змогу знехтувати впливом свердління на величину залишкових напружень. Беручи до уваги твердість матеріалу, були використані зворотно конусні алмазні свердла. Відсутність значної зміни геометрії інструменту проконтрольовану під мікроскопом після проведення вимірювань підтвердив правильність вибору інструменту.

Для визначення впливу тиску робочої рідини на контактну витривалість було проведено випробування партій по 15 зразків: у вихідному стані та зміцнених протягом 3-х хвилин за тиску робочої рідини 0,16; 0,2; 0,25 МПа при температурі 20 °С та 300 °С відповідно.

Розглянуті режими зміцнення призводять до збільшення шорсткості порівняно з поліруванням приблизно на один квалітет. Найменша зміна шорсткості спостерігається за тиску робочої рідини 0,2 МПа.

Глибину наклепу визначали за розподілом мікротвердості поперечного перерізу зразка. Глибина зміцненого шару за всіх режимів обробки перебуває в межах 0,08...0,1 мм. За тиску робочої рідини 0,16 МПа спостерігалось зниження мікротвердості, що пов'язано з нестабільністю процесу і нерівномірністю зміцнення.

Розподіл залишкових напружень за глибиною зразка показує переваги режимів

Машинобудування і зварювальне виробництво

зміцнення при тиску робочої рідини 0,2 і 0,25 МПа (рис. 1). Характер розподілу відповідає даним, отриманим для ППД мікрокульками [1], [8].

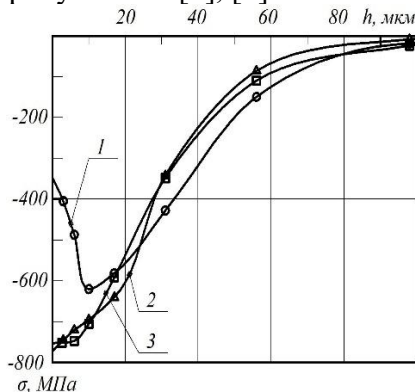


Рисунок 1 – Розподіл залишкових напружень після обробки мікрокульками:
1 – $p=0,16$ МПа; 2 – $p=0,2$ МПа; 3 – $p=0,25$ МПа

Огляд і контроль зразків до і після випробувань свідчив, що знос їхніх робочих поверхонь внаслідок стирання був практично відсутній. Основною причиною виходу з ладу зразків як при температурі 20°C , так і температурі 300°C була класична контактна втома поверхневих шарів, що супроводжується появою піттингу.

У результаті статистичного опрацювання було визначено: середньологарифмічну довговічність N_{50} , що відповідає 50% ймовірності руйнування; гарантовану довговічність N_{10} , що відповідає 10% ймовірності руйнування зразків, а також середньоквадратичне відхилення. За обчисленими значеннями побудовано прямі апроксимації функції розподілу логарифмів чисел циклів (рис. 2, 3).

Встановлено, значне збільшення довговічності досліджуваних зразків спостерігається при збільшенні часу обробки з 1,5 до 3 хвилин, що пояснюється збільшенням залишкових напружень стиснення на поверхні зразка та зменшенням шорсткості поверхні. При подальшому збільшенні часу 6 хвилин, збільшення довговічності не суттєве, а при збільшенні часу обробки до 9 хвилин довговічність зразків взагалі зменшилася у зв'язку з зниженням шорсткості поверхні внаслідок інтенсивного надклепування.

За результатами досліджень встановлено, що найбільша довговічність зразків досягається при зміцненні за допомогою тиску робочої рідини 0,2 МПа, що зумовлено сприятливим поєднанням величини залишкових напружень, наклепу та мікротвердості, які отримано за мінімального збільшення шорсткості.

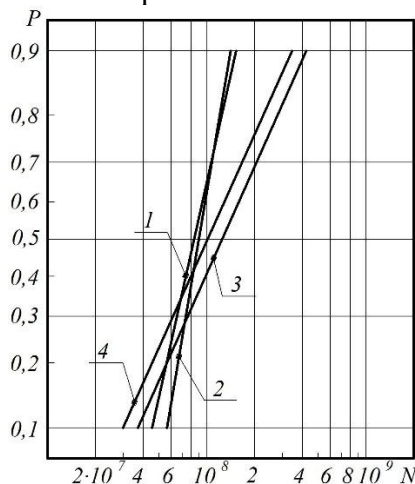


Рисунок 2 – Графіки функцій розподілу довговічності зразків за температури 20°C :
1 – початковий стан; 2 – $p=0,16$ МПа; 3 – $p=0,2$ МПа; 4 – $p=0,25$ МПа

Машинобудування і зварювальне виробництво

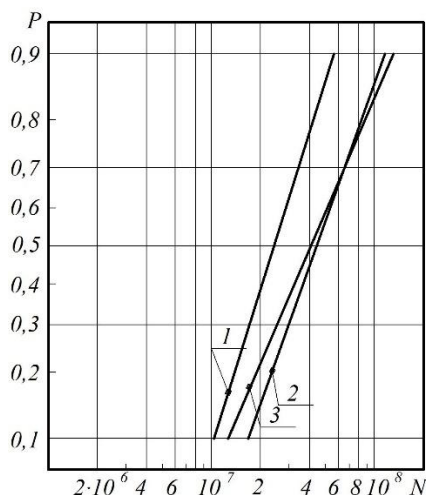


Рисунок 3 – Графіки функцій розподілу довговічності зразків за температури 300°C:
1 – початковий стан; 2 – $p=0,2$ МПа; 3 – $p=0,25$ МПа

Зниження довговічності зразків, за результатами контактних випробувань при підвищеній температурі до 300 °C, на нашу думку пов'язане із проявом поверхнево-активних властивостей мастила ВТ-301. Відбувається збільшення здатності мастила проникати у мікропошкодження поверхні зразка, кількість яких збільшується із збільшенням часу обробки. Це припущення додатково підтверджується характерним виглядом втомного руйнування зразків випробуваних при температурі 300 °C – майже одночасного утворення на доріжці контакту кількох втомних піттингів.

Вплив тиску робочої рідини на контактну витривалість сталі при зміцненні скляними шариками проводили для трьох партій зразків що було зміцнені за наступними режимами: $p=0,18$ МПа; $p=0,25$ МПа; $p=0,3$ МПа; при температурі 20 °C та 300 °C. Обробка зразків проходила відповідно аналогічним попереднім партіям. Контроль жорсткості поверхні зразків проведений після їх зміцнення при різних тисках робочої рідини показав, що найменшу шорсткість мають зразки при $p=0,3$ МПа; а найбільшу при $p=0,18$ МПа - це є слідством недостатньо стабільної роботи соплового апарату установки в процесі зміцнення при невисоких тисках робочої рідини. Аналізуючи результати випробувань (рис. 2-5) можна зробити висновок, що режим зміцнення сталі скляними кульками про тиску робочої рідини $p=0,3$ МПа є найбільш раціональною з точки зору підвищення контактної витривалості.

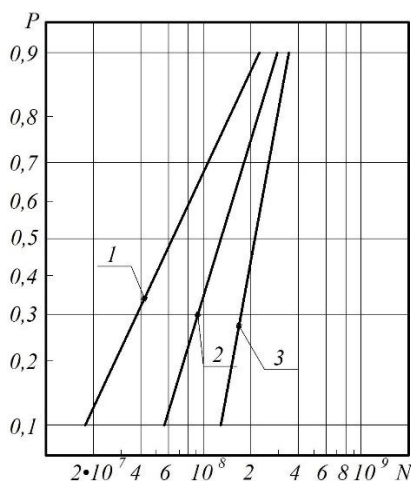


Рисунок 4 – Графіки функцій розподілу довговічності зразків оброблених скляними кульками за температури 20°C: 1 – $p=0,18$ МПа; 2 – $p=0,25$ МПа; 3 – $p=0,3$ МПа

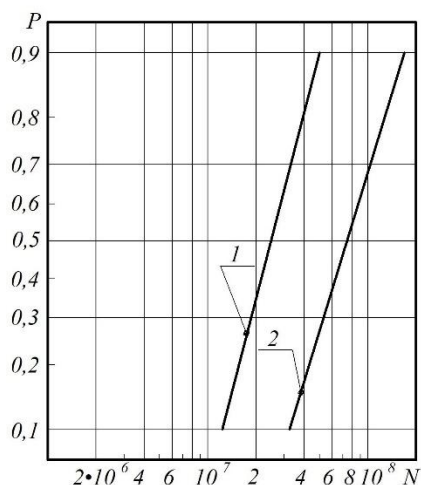


Рисунок 5 – Графіки функцій розподілу довговічності зразків оброблених скляними кульками за температури 300°C: 1 – $p = 0,18$ МПа; 2 – $p = 0,3$ МПа

Встановлено закономірності впливу режимів зміцнення мікрокульками та скляними кульками на контактну витривалість сталі EI-347Ш. Застосовано більш сучасні методики випробувань.

Визначено раціональні параметри зміцнення зразків зі сталі EI-347Ш мікрокульками та скляними кульками, які забезпечують підвищення довговічності при контактному навантаженні. Це дасть змогу підвищити надійність вальниць для широкої номенклатури машин спеціального машинобудування. Удосконалено методику та оновлено матеріально-технічну базу лабораторії контактної міцності, що дало змогу підвищити достовірність отриманих результатів.

ВИСНОВКИ

1. Показано, що зміцнення мікрокульками та скляними кульками є перспективним напрямком ППД для деталей вальниць зі сталі EI-347Ш, яке забезпечує підвищення контактної довговічності як при 20 °C, так і при 300 °C та дозволяє підвищити контактну витривалість у 1,5...2 рази.

2. Визначено параметри зміцнення зразків зі сталі EI-347Ш мікрокульками, та скляними кульками, що забезпечують підвищення довговічності при контактному навантаженні. Встановлено, що найбільша довговічність зразків досягається при зміцненні скляними кульками при тиску робочої рідини 0,3 МПа.

3. Отримано закономірності розподілу залишкових напружень за глибиною зразків зі сталі EI-347Ш за різних режимів зміцнення мікрокульками та скляними кульками.

У подальших роботах необхідно дослідити вплив на контактну витривалість інших методів зміцнення поверхневого шару деталей, що працюють в умовах високих контактних напружень.

Список використаних джерел

1. Cretu S., Benchea M., Cretu O. Compressive Residual Stresses Effect on Fatigue Life of Rolling Bearings. *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings (IMECE)*. 2007. Vol. 3. P. 1–6. DOI: 10.1115/IMECE2007-43561.
2. Zhang X., Wu D., Xia Z., Li Y., Wang J., Han E. Comparative Study on Surface Contact

Машинобудування і зварювальне виробництво

Fatigue of Machine Tool Bearing Raceways with Different Rolling Elements: Two Failure Bearings Case Studies. *Tribology Letters*. 2023. Vol. 71. P. 1-6. DOI: 10.1007/s11249-023-01722-7.

3. Cretu S., Benchea M. Residual stresses effect on fatigue life of rolling contacts. *10th International Conference on Tribology – November 8-10, 2007*. P. 106–110.

4. Aftanaziv I., Strohan O., Svidrak I., Royko Y., Berezovetska O., Bielikov D., Kernytsky N., Chalecki M. Increasing the durability of large-calibre cannon barrels through strengthening them by surface plastic deformation. *Acta Scientiarum Polonorum. Architectura*. 2024. Vol 23. P.351–357. DOI: 10.22630/ASPA.2024.23.27.

5. Guo J., Zhao A., Yang M. Mechanism of Microstructural Alterations of M50 Bearing Steel during Rolling Contact Fatigue under High Loads. *Metals*. 2023. Vol. 13(4). P. 1–15. DOI: 10.3390/met13040769.

6. ASTM E837-08. Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole Drilling Strain-Gage Method. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2008. – 16 p.

7. Harada Y., Tanaka S. G0400401 Effect of hard microshot peening on fatigue strength of spring steel. *The Proceedings of Mechanical Engineering Congress, Japan*. 2015. P. 1–8.

8. Harada Y., Yoshida K. Effect of Microshot Peening on Surface Characteristics of Spring Steel. *Materials Science Forum*. 2010. Vols. 654-656. P. 374-377. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.654-656.374.

9. Karar G., Kumar R., Chattopadhyaya S. A recent development on the material surface using shot peening and friction surfacing for industrial applications. *AIP Conference Proceedings*. 17 November. 2022. P.1–8. DOI: 2681. 020027. 10.1063/5.0115763.

10. MTS3000 – Restan. Automatic System for Residual Stress Measurement by Hole-Drilling. - SINT Technology s.r.l., 2014. – 8 p.

11. Rubio H., Bustos A., Castejón C., Garcia-Prada, J.C. Evolution of Rolling Bearing Technology. *Advances in Mechanism and Machine Science*. 2023. P.991–1002. DOI: 10.1007/978-3-031-45709-8_97.

12. Yu B., Chunling X., Gao K., Yang W., Xin W., Sun Z., Zhang B., Tang Z. (2024). Effect of Compound Surface Modification of Shot Peening and DLC Coating on Surface Integrity and Fatigue Properties of Gear Steel 16Cr3NiWMoVNbE. *Heliyon*. 2024. Vol. 10. №18. P.1–13. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e37991.

13. Beswick J. Bearing Steel Technologies: 10th Volume, Advances in Steel Technologies for Rolling Bearings. 2015. –620 p.

Sidorenko M. V., Frolov R. O., Yemanov N. F., Kapustian O.Ye.

ADVANCED METHODS FOR IMPROVING CONTACT RESISTANCE FOR STEEL EI-347SH

The new generation bearings of machines are becoming increasingly complex products, which meet high requirements for the contact fatigue, including one at elevated temperature. The surface plastic deformation (SPD) is used to increase the contact fatigue. One promising direction of SPD is micro-ball strengthening. The majority of works does not take into account the influence of temperature onto the contact fatigue of parts after SPD. The aim of the study is to increase the contact endurance of steel EI-347SH through the rationalization of modes of micro-ball and glass bead strengthening. Contact fatigue tests were carried out with the setup MKV-T at temperatures of 20 °C and 300 °C. All the samples were polished before strengthening. For this purpose a special device, which ensures a constant pressure on the sample during polishing was designed. The determination of residual stresses was performed on surveillance samples by the blind hole drilling method. To determine the influence of fluid pressure on the contact endurance a group of tests was carried out

Машинобудування і зварювальне виробництво

on four batches of samples: the samples in the original state, the samples strengthened within 3 minutes at the working fluid pressure of 0.16 MPa and the same but with pressure of 0.2; 0.25 MPa respectively. Selected strengthening modes lead to an increasing of surface roughness for about one quality class if to compare to after-polishing state. The lowest change in surface roughness was observed with the working fluid pressure of 0.2 MPa. For all modes, the depth of the strengthened layer is in the range of 0.08 ... 0.1 mm. The decrease in microhardness, which is related to instability and unevenness of the strengthening process, was observed at the working fluid pressure of 0.16 MPa. The mean log durability and the guaranteed durability was determined; straight lines approximating the distribution functions of logarithms of numbers of cycles were built. It was found that the highest durability of the glass bead blasting samples was obtained by strengthening mode with the working fluid pressure of 0.3 MPa that is caused by a favorable combination of levels of residual stresses, strain hardening, microhardness, in conjunction with a minimal increase in the surface roughness. Regularities of influence of the micro-balls and glass bead strengthening modes on the steel EI-347SH contact endurance were defined. More advanced testing methods were applied. The parameters of micro-ball and glass bead strengthening that provide increased durability under contact loading for steel EI-347SH samples were determined. This enables one to assign the modes of SPD when designing the bearings for promising type of gas turbine engines more efficiently. The test procedure has been improved, resulting in improved reliability of the experimental results.

Keywords: bearings, contact fatigue, residual stresses, durability, micro-ball strengthening, glass bead.

Стаття надійшла 16.05.2025р.