

УДК 669.715

Д-р техн. наук І. П. Волчок, д-р техн. наук О. А. Мітяев, канд. техн. наук О. А. Глотка
Запорізький національний технічний університет, м. Запоріжжя

ПРИРОДА ЦИКЛІЧНОГО РУЙНУВАННЯ ВТОРИННОГО ПОРШНЕВОГО СИЛУМІНУ АЛ25

Розглянуто вплив модифікування і лазерної обробки на процеси циклічного руйнування поршневого силуміну АЛ25 при температурах 20 і 300 °С.

Ключові слова: силумін, модифікування, лазерна обробка, циклічне руйнування.

Жароміцні силуміни використовують для виготовлення деталей, що працюють при температурах від 130 до 300 °С; до цих виробів відносяться поршні, головки циліндрів, диски та лопатки компресорів газотурбінних двигунів [1]. На даний момент найбільш широке розповсюдження для виготовлення поршнів отримав ливарний сплав евтектичного складу АК12М2МгН (АЛ25). Перевагами цього сплаву є мала густина, високі міцність та теплопровідність, низький температурний коефіцієнт лінійного розширення та високий рівень ливарних властивостей [2].

За рахунок накопичення великої кількості відходів виробництва (ливники, випори, брак деталей, стружка, переплав відходів та сплесків і вживані деталі) постала нагальна задача у використанні вказаного виду матеріалу. Однак повторне переплавлення виявило, що за рахунок попадання в шихту різних домішків, в першу чергу заліза, можливе утворення комплексних інтерметалідів пластинчастої форми і великих розмірів, це значно знижує рівень механічних і експлуатаційних властивостей алюмінієвих сплавів. Для усунення шкідливого впливу інтерметалідів їх форму і розміри змінюють за допомогою модифікуючих комплексів [3].

Також перспективною поверхневою обробкою, з метою підвищення стійкості деталей, є лазерна обробка. При використанні цього методу у матеріалі значно збільшуються фізичні, хімічні та механічні властивості [4, 5].

Метою роботи є дослідження процесів руйнування під дією циклічних навантажень вторинного поршневого алюмінієвого сплаву АК12М2МгН (АЛ25, що модифікований та додатково оброблений лазером.

Матеріал та методика досліджень

Для виготовлення сплаву АК12М2МгН (АЛ25) використовувався 100 % зворот виробництва, який очищався від слідів корозії, піску та пригару. В електричній печі опору з використанням чавунного тиглю, що футерований графітом, було виплавлено 8 плавки, що в подальшому проходили різні види оброблення (табл. 1). Всі плавки були оброблені покривним флюсом (33 мас. % КСІ і 67 мас. % NaCl) у кількості 2 % від маси металу. Перші 4 плавки не оброблювались комплексним модифікатором, плавки 5–8 були модифіковані МК-1 [6] при температурі 710 °С. Хімічний склад всіх плавки відповідав ДСТУ 2839-94. Термічну обробку виконували за режимом Т1 (старіння 210 °С), що також відповідає вимогам ДСТУ 2839-94.

Зразки для випробування на втому мали пластинчасту форму з перерізом 2×6 мм. Після старіння зразки плавки 4, 5, 7, 8 були оброблені (по двом боковим поверхням) імпульсним лазером КВАНТ 12 в режимі оплавлення (час дії імпульсу 4 мс, довжина хвилі 0,6943) з 30 % перекриттям доріжок в атмосфері навколишнього середовища (обробку виконано під керівництвом д-ра фіз.-мат. наук, проф. Гіржона В.В.)

У подальшому зразки випробовували на втому на базі 10⁷ циклів на високочастотному стенді ИП-2 Білоруського державного технологічного університету при частоті 18 кГц відповідно до вимог ГОСТ 25.502-79 (під керівництвом к.т.н., доц. Бельського О. С.). Зразки плавки 1, 3, 5, 7 випробовувались при кімнатній температурі, плавки 2, 4, 6, 8 при температурі 300 °С. За результатами випробувань будували криві в напівлогарифмічних координатах $\sigma - \lg N$.

Таблиця 1 – Характеристики експериментальних плавки

Номер плавки	Обробка розплаву МК-1, мас. %	Обробка поверхні лазером	Температура випробувань, °С
1	0	Відсутня	20
2	0	Відсутня	300
3	0	Оброблено лазером	20
4	0	Оброблено лазером	300
5	0,15	Відсутня	20
6	0,15	Відсутня	300
7	0,15	Оброблено лазером	20
8	0,15	Оброблено лазером	300

Фрактографічні дослідження проводили на зруйнованих після випробування на втому зразках з використанням растрового електронного мікроскопу РЕМ-1061 у вторинних електронах у режимі прискорювальної напруги 30 кВ.

Рух тріщини аналізували на зразках, що не до кінця зруйнувались та в яких при випробуваннях на втому почала розвиватися тріщина. Для цього на торцю проводили шліфування до виявлення мікротріщини, після чого полірували та травили реактивом Крефельда (12,5мл HCL, 25мл HNO₃, 50мл HCL, 12,5мл H₂O). Виявлення структурних складових та рентгеноспектральний мікроаналіз (РСМА) проводили на РЕМ-1061 у вторинних електронах у режимі прискорювальної напруги 20кВ.

Результати досліджень та їх аналіз

На зруйнованих зразках вторинного поршневого алюмінієвого евтектичного сплаву спостерігалась типова картина поверхні руйнування в умовах циклічних навантажень, що закономірно змінювалась у залежності від температури випробувань та зміни структури і поверхневого стану зразків.

Так порівняння фрактограм при випробуванні на втому при кімнатній температурі 300 °С виявляє збільшення в розмірах фасеток, що змінюють свою орієнтацію від зерна до зерна (рис. 1 *а, б*). У середині кожного зерна траєкторія руйнування нагадує площину сколу. Внаслідок різниці в орієнтуванні зерен частина фронту тріщини розповсюджується по в'язкому механізму, що призводить до утворення терас, які чергуються та які мають в'язкі та крихкі борозенки.

Серії плавів 5 та 6 модифікували МК-1 [6] та випробували на втому при кімнатній та при температурі 300 °С. Типові фрактограми поверхонь руйнування для цих серій зразків наведені на рисунку 1 *в, г*. Якісне порівняння дає змогу стверджувати, що руйнування при вищих температурах відбулося за умов зниження його енергоємності, про що свідчить збільшення розміру структурних складових зламу.

Дослідження руху тріщини по структурним складовим на незруйнованих зразках, що не модифікувались, виявило схильність розвитку руйнування по фазах, що мають пластинчасту будову з гострими краями (рис. 2).

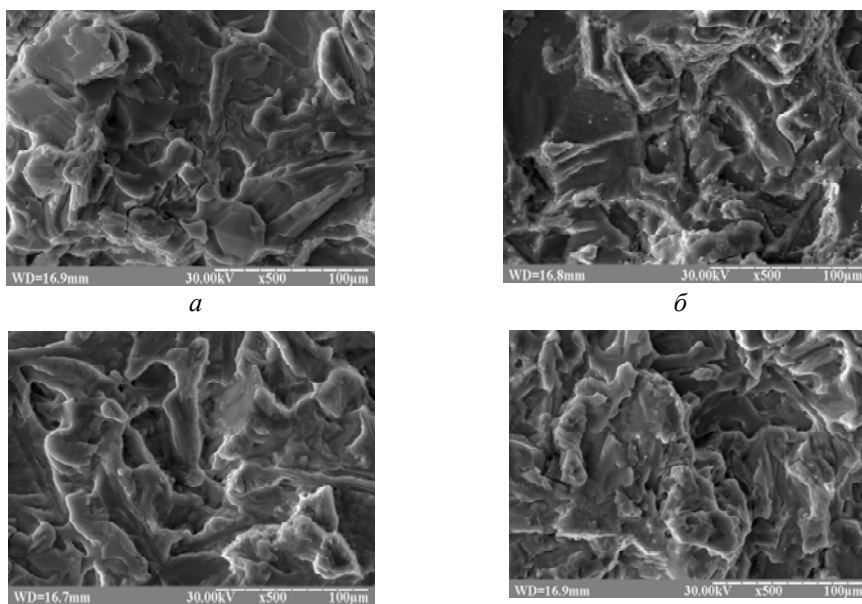


Рис. 1. Фрактограми поверхонь руйнування вторинного силуміну АЛ25:

а – сплав не модифікований, температура випробування 20 °С; *б* – сплав не модифікований, температура випробування 300 °С; *в* – сплав модифікований, температура випробування 20 °С; *г* – сплав модифікований, температура випробування 300 °С

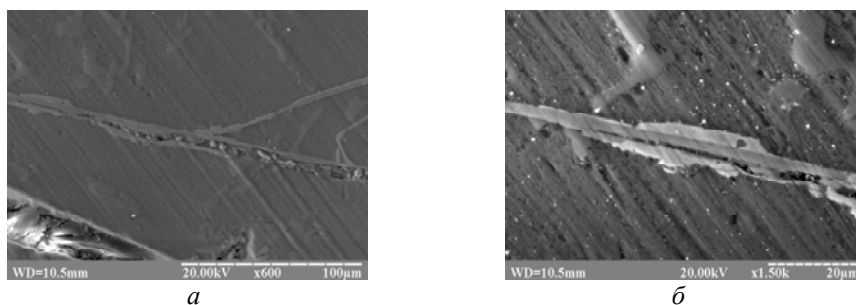
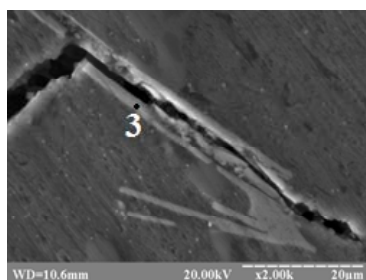


Рис. 2. Характер розповсюдження тріщини в немодифікованих зразках сплаву АЛ25: *а* – $\times 600$; *б* – $\times 1500$

Проведення РСМА включень по яким пройшло руйнування (рис. 3) вказує на те, що несприятливу пластинчасту форму мали включення фаз $Al_{15}(Fe, Mn, Ni, Cu)_3Si_2$, Al_3CuNi , $Al_{15}(Fe, Mn)_3Si_2$ (табл. 2). Також на вказаних включеннях дуже часто спостерігається наявність вторинних тріщин, що також знижують характеристики втоми (рис. 4).



а



б

Рис. 3. Типові точки проведення РСМА (див. табл. 2)

У статті [7] доведено, що збільшення витривалості силумінів можливе в разі використання модифікуючого комплексу МК-1, що змінює морфологію вторинних інтерметалідних фаз, та підвищує енергоємність процесу руйнування.

Розгляд руху тріщини в модифікованих зразках не виявив проходження руйнування по структурним складовим, що мали пластинчасту форму. У більшості випадків руйнування проходило по компактним включенням, які класифікуються як β - твердий розчин на основі кремнію та інтерметаліди типу $Al_{15}(Fe, Mn, Ni, Cu)_3Si_2$, що мають форму ієрогліфів або наближаються до шестигранної форми (рис. 5) (табл. 3).

Внаслідок лазерної обробки в режимі оплавлення зразків плавок 3,4 та 7,8 різко зросла шорсткість їх поверхні за рахунок формування кратерів глибиною 6...7 мкм. Погіршення якості поверхні зразків, а також виникнення

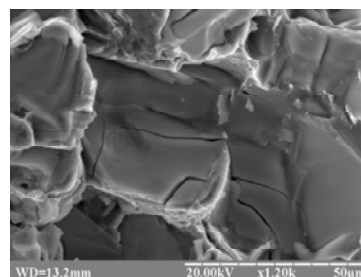


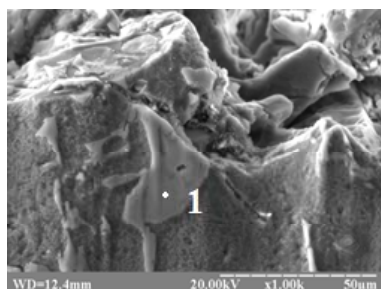
Рис. 4. Вторинні тріщини в немодифікованому сплаві АЛ25 ($\times 1200$)

Таблиця 2 – Хімічний склад (ат.%) типових точок в сплаві АЛ25

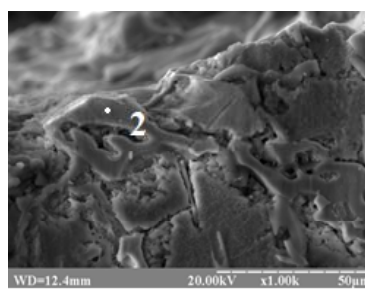
Точка	Mg	Al	Si	Ti	Mn	Fe	Ni	Cu	Фаза
1	0,22	68,86	4,14	–	1,2	3,13	18,99	3,44	$Al_{15}(Fe, Mn, Ni, Cu)_3Si_2$
2	0,22	68,93	7,25	0,08	13,47	8,6	0,74	0,69	$Al_{15}(Fe, Mn)_3Si_2$
3	0,02	53,49	0,42	0,15	0,05	0,197	27,97	17,7	Al_3CuNi

Таблиця 3 – Результати РСМА (ат.%) в типових місцях зруйнованих зразків

Точка	Mg	Al	Si	Ti	Mn	Fe	Ni	Cu	Фаза
1	-	2,4	97,60	-	-	-	-	-	Si
2	0,3	67,79	3,48	0,01	1,09	3,67	19,57	4,08	$Al_{15}(Fe, Mn, Ni, Cu)_3Si_2$



а



б

Рис. 5. Типові місця проведення РСМА

на ній розтягувальних напружень внаслідок швидкого охолодження поверхневого шару розплавленого металу сприяло прискореному, при перших циклах навантажень, зародженню мікротріщин на оплавленій поверхні зразків (рис. 6). Для зменшення впливу геометричного фактору поверхні зразків після оплавлення була відшліфована до шорсткості Ra 032 з видаленням шару оплавленого металу товщиною 30...50 мкм з обох сторін зразків.

Типові фрактограми поверхні руйнування обробленого лазером шару зразків, що пройшли модифікування та без модифікування, наведені на рисунку 7. Порівняння отриманих фрактограм не виявило значних відмінностей між серіями зразків, незначно також впливають і випробування при підвищених температурах. Такі незначні відмінності обумовлені утворенням однорідного гомогенного твердого розчину після лазерної обробки, що не змінює свого стану навіть при нагріванні до 300 °С.

Оскільки зародження тріщини та руйнування зразка при циклічних випробуваннях починаються з поверхні, то першим опирається розповсюдженню втомної тріщини саме шар оброблений лазером. Як і для всіх циклічних руйнувань для нього є характерним початковий рух тріщини під кутом 45° до поверхні, що



Рис. 6. Типова поверхня обробленого лазером зразка з тріщиною після перших циклів навантажень ($\times 500$)

добре видно на рис. 7 *а, б*. Розвиток тріщини втомі характеризується зміною орієнтації головної площини руйнування в кожному зерні від однієї або двох площин зсуву до багатьох паралельних терас, що розділені позовжніми гребенями. Ці тераси перпендикулярні напрямку максимального напруження. Також чітко видні деталі в'язких втомних борозенок, що мають волокнистий характер з чітким фронтом розповсюдження (рис. 8).

Порівняння фрактограм основного, не обробленого лазером матеріалу, не виявило значних відмінностей між зразками плавки 5, 6. Характер руйнування залишається типовим для циклічних випробувань, різниця між зруйнованими при кімнатній та при 300 °С зразках характеризується збільшенням розміру структурних складових зламу.

Порівняння результатів випробувань втомної міцності всіх плавки, засвідчило, що найвищі характеристики втомі мали зразки 5 плавки, лише оброблені модифікуючим комплексом (рис. 9). Це викликано зміною морфології інтерметалідних включень (відбулась зміна від пластинчастої та голчастої форми до типу китайських ієрогліфів або шестигранної) (рис. 10), що збільшує енергоємність руху тріщин у матеріалі.

Типовою структурою для плавки 1–4 є наявність великих пластинчастих та голчастих включень, що мають незначний переріз по товщині (рис. 10 *а*). Середній параметр форми для них склав 58,4, що свідчить про велику протяжність даних включень. Крім того кінці пластин мають невеликий радіус заокруглення, який може слугувати центром зародження тріщини. Це призводить до того, що немодифіковані зразки мають приблизно на 15–20 МПа занижені показники втомної міцності в порівнянні з модифікуванням.

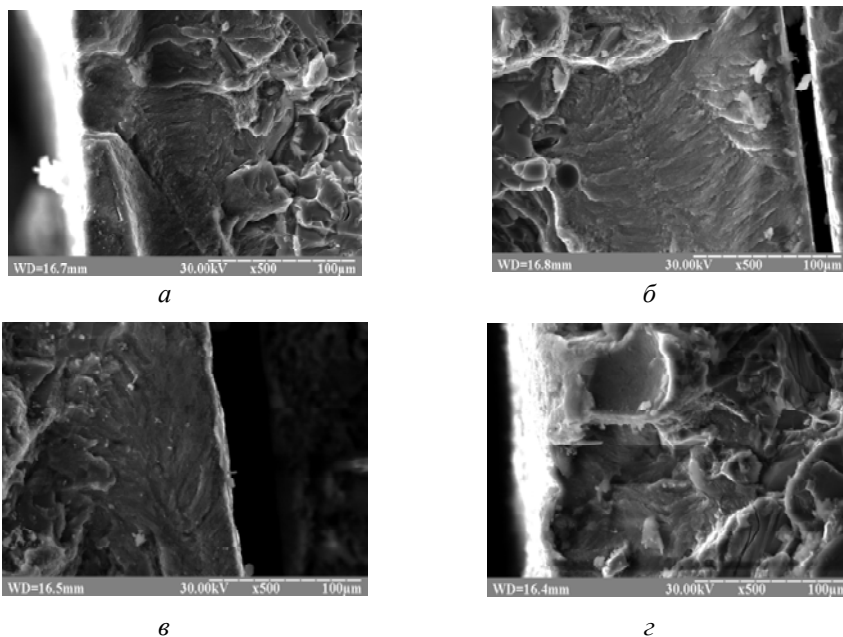


Рис. 7. Типові фрактограми поверхні руйнування шару обробленого лазером для зразків, що пройшли модифікування та без нього: *а, б* – без модифікування; *в, г* – з модифікуванням; *а, в* – випробування при 20 °С; *б, г* – випробування при 300 °С

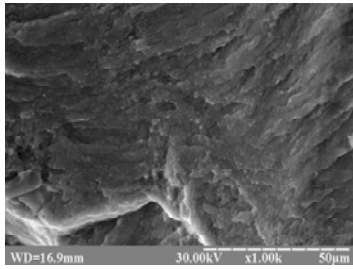


Рис. 8. Типова поверхня руйнування шару, обробленого лазером зразка зі сплаву АЛ25

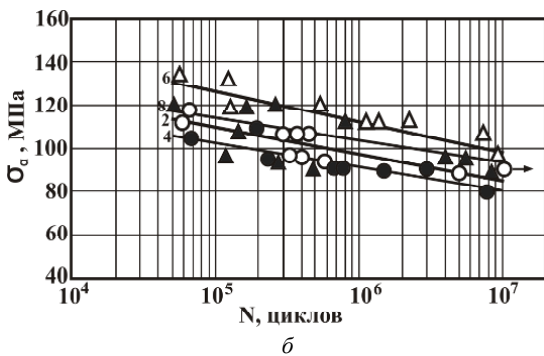
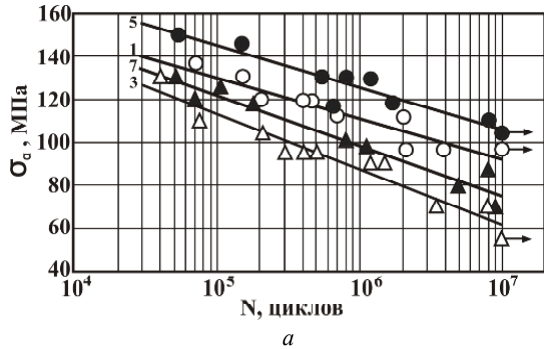
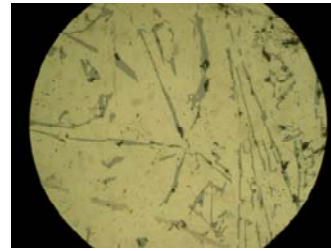


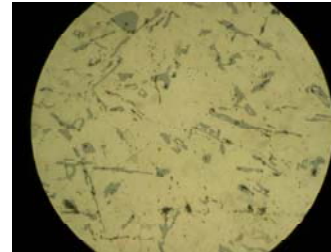
Рис. 9. Криві втоми вторинного поршневого силуміну АЛ25: а – випробування при 20°C; б – випробування при 300 °С

Збільшення температури випробування до 300 °С (рис. 10, б) дещо знижує втомну міцність зразків, що може бути пояснено зростанням дифузійних процесів та збільшенням рухомості атомів, що зменшує енергоємність процесу руйнування. Також кут нахилу кривих втоми також зменшується майже вдвічі, а вплив модифікування виражається значно більше. Так різниця між модифікованими та не модифікованими зразками зростає до 20–25 МПа.

Усі зразки, що оброблені лазером, показали нижчу циклічну міцність, ніж необроблені. Така поведінка може бути обумовлена значною крихкістю та шорсткістю поверхні зразків, що значно покращує умови зародження тріщини. Таким чином, при обробці лазером необхідно приділяти увагу саме поверхні, що обробляється, оскільки збільшення крихкості та шорсткості суттєво знижує показники витривалості матеріалу.



а



б

Рис. 10. Мікроструктура сплаву АЛ25 (Ч500): а – без модифікування (плавка 1); б – обробка 0,15 % МК-1 (плавка 5)

Висновки

1. Проведено якісне порівняння фрактограм поверхонь руйнування зразків вторинного поршневого силуміну АЛ25 після випробування на циклічну втому. Виявлено збільшення розміру структурних складових зламів з підвищенням температури та зменшення з введенням модифікувального комплексу.
2. Встановлено, що в зразках без модифікування тріщина рухається по інтерметалідах пластинчастої або голчастої форми, від яких можливе утворення вторинних тріщин, додатково знижуючи властивості матеріалу.
3. Введення модифікуючого комплексу значно підвищує циклічну міцність зразків та змінює шляхи руху тріщини по більш енергоємним структурним складовим.
4. Оброблення лазером знижує втомну міцність зразків за рахунок наявності розвинутої поверхні.

Список літератури

1. Повышение ресурса работы поршней двигателей внутреннего сгорания / [Б. М. Немененок, В. А. Калиниченко, М. А. Садоха и др.] // *Литье и металлургия*. – 2005. – № 2. – С. 175–178.
2. Панфилов А. В. Современные тенденции перспективы применения алюмоматричных композиционных материалов для поршнем ДВС, получаемых литьем с кристаллизацией под давлением / А. В. Панфилов, А. А. Панфилов, В. В. Ликсно // *Процессы литья*. – 2004. – № 4. – С. 14–19.
3. Міт'яєв О. А. Науково-технологічні основи формування структури, фізико-механічних і службових властивостей вторинних силумінів : дис. ... доктора техн. наук: 05.02.01 / Міт'яєв Олександр Анатолійович. – Запоріжжя, 2008. – 285 с.
4. Volchok I. P. Increasing of microhardness of Al-Si alloys by laser treatment / I. P. Volchok, V. V. Girzhon, I. V. Tantsiura // *Металлофізика и новейшие технологии*. – 2011. – Т. 33, № 8. – С. 1111–1118.

5. Широкобокова Н. В. Поверхнєве зміцнення вторинних силумінів методом лазерної обробки : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.01 / Широкобокова Наталя Вікторівна. – Запоріжжя, 2013. – 158 с.
6. Пат. 46094 Україна, МПК (2009) C22C1/00. Модифікувальний комплекс для алюмінієвих сплавів / Лоза К. М., Мігяєв О. А., Волчок І. П. ; заявник та патентоутримувач Запорізький нац. техн. ун-т. – № u200905914 ; заявл. 09.06.2009 ; опубл. 10.12.2009, Бюл. № 23.
7. Increasing of intermetallic phases on fracture resistance of silumins / O. A. Mityayev, I. P. Volchok, O. V. Gnatenko and etc. // Строительство, материаловедение, машиностроение. Сб. науч. трудов. Вып. 73, Дн-вск, ПГАСА, 2014. – С. 159–164.

Одержано 26.04.2016

Волчок И.П., Митяев А.А., Глотка А.А. Природа циклического разрушения вторичного поршневого силумина АЛ25

Рассмотрено влияние модифицирования и лазерной обработки на процессы циклического разрушения поршневого силумина АЛ25 при температурах 20 и 300°C.

Ключевые слова: *силумин, модифицирование, лазерная обработка, циклическое разрушение.*

Volchok I., Mityayev A., Glotka A. The nature of cyclic fracture secondary piston silumin АЛ25

The influence of modification and laser treatment on the processes of the cyclic destruction of the piston silumin АЛ25 at temperatures of 20 and 300°C are studied.

Key words: *silumin, modification, laser treatment, cyclic destruction.*
