

УДК: 621.785:669.146:004.42

Н. Е. МАК-МАК, М. А. РЯБИКИНА, А. П. ЧЕЙЛЯХ

ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», Украина

ВЛИЯНИЕ ЦЕМЕНТАЦИИ И ЗАКАЛКИ ОТ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУР НА ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ И ШЕРОХОВАТОСТЬ ИЗНОШЕННОЙ ПОВЕРХНОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ

Изучены износостойкость и морфология поверхности изнашивания конструкционных сталей 25 и 50Г после цементации и закалки от различных температур. Показана возможность применения методов статистического анализа для оценки шероховатости профиля. Установлена взаимосвязь коэффициента относительной износостойкости с характеристиками профиля изношенной поверхности.

Ключевые слова: шероховатость, математическая статистика, цементация, абразивная износостойкость, поверхность износа.

Введение. Около 90 % деталей машин выходит из строя в результате износа поверхностей, при этом затраты на ремонт или восстановление деталей машин могут значительно превышать ее стоимость. Их эксплуатационные характеристики, такие как износостойкость, определяются структурно-фазовым состоянием поверхностных слоев и могут быть значительно улучшены за счет их модификации. Упрочняющий эффект цементации достигается за счет наведения остаточных напряжений сжатия в поверхностном слое, а также высокой твердости поверхности по Роквеллу $HRC59...62$ при наличии вязкой сердцевины твердостью $HRC32...40$ [1]. Так же повышение содержания углерода в поверхностном слое способствует увеличению количества остаточного аустенита после закалки, способного к деформационному мартенситному превращению при изнашивании (ДМПИ) [2].

Несмотря на широкое изучение и применение упрочняющих методов обработки [2–5], ремонтное производство сталкивается с проблемами количественной оценки влияния режимов обработки на эксплуатационные характеристики упрочненной поверхности.

Поскольку упрочняющей обработке подвергаются контактирующие поверхности, важно знать влияние параметров этого процесса не только на износостойкость, но и на шероховатость изношенной поверхности деталей машин.

В связи с этим целью настоящей работы является исследование возможностей применения методов математической статистики для оценки параметров износа и шероховатости упрочненной поверхности.

Материал и методика исследований. Выбранные для исследования образцы стали 25 и 50Г подвергались цементации в твердом карбюризаторе при температуре 930 °С с выдержкой 10 часов (охлаждение в коробе). После цементации на одной партии образцов проводилась закалка в масло от различных температур в интервале 800 – 1100 °С и низкий отпуск при 200 °С, а на другой партии проводилась плазменная закалка с различной величиной тепловложения, что обеспечивало нагрев в интервале температур от 900 до 1500 °С и регулировалось скоростью перемещения образцов относительно плазменной струи аргона в пределах от 0,08 м/час до 0,63 м/час. После скоростного плазменного нагрева со скоростью $10^3...10^4$ °С/с происходило естественное охлаждение упрочненной поверхности со скоростью выше критической за счет теплоотвода во внутренние

области образцов. Величиной тепловложения регулировали различные фазово-структурные состояния упрочненного слоя с содержанием различного количества и степени метастабильности остаточного аустенита ($A_{ост}$) наряду с мартенситом и цементитом [3].

Относительная абразивная износостойкость (ϵ_m) определялась на установке Бринелля – Хаурта о полужакрепленные абразивные частицы. В качестве абразива использовался корунд. Образцы изнашивались в течение 5 мин по шесть раз, общее время изнашивания составило 30 минут. После каждого испытания (в 5 мин.) проводилось их взвешивание с точностью до $\pm 0,0001$ г. Потерю массы определяли как суммарную потерю масс после каждого испытания. После испытаний на абразивное изнашивание проводилось исследование изношенной поверхности образцов с помощью сканирующего 3D микроскопа Digital microscope VHX-1000¹.

Для исследования шероховатости поверхности образцов, были выбраны те, у которых показатели относительной износостойкости были выше (образцы стали 25 и 50Г после закалки от 900 °С, 1000 °С и отпуска при 200 °С, а так же после плазменной закалки при 1200-1400 °С) [2; 6], табл. 1.

Таблица 1

Значения коэффициента относительной износостойкости (ϵ_r) после цементации и термической обработки [2; 6]

Режим упрочнения *	Сталь 25			Сталь 50Г		
	З 900 °С + О 200 °С	З 1000 °С + О 200 °С	ПЗ 1200– 1400 °С	З 900 °С+ О 200 °С	З 1000 °С+ О 200 °С	ПЗ 1200- 1400 °С
Коэффициент относительной износостойкости ϵ_m	2,6	3,2	1,6	3,1	4,2	1,8

*З – закалка, О – отпуск, ПЗ – плазменная закалка

Теория и анализ полученных данных. Шероховатость поверхности – совокупность неровностей с относительно малыми шагами, образующих рельеф поверхности в пределах базовой длины l [7]. Наиболее широкое применение при решении контактных задач получили следующие способы оценки шероховатости поверхности [8]:

- 1) Графическое изображение профиля поверхности;
- 2) Статистические методы оценки профиля;
- 3) Аналитическое выражение (уравнение) профильной кривой.

Профили поверхностей изнашивания в 3D-изображениях представлены на рис. 1. Сечение поверхности, перпендикулярной к ней плоскостью дает представление о профиле ее рельефа: о количестве, форме и величине выступов и впадин неровностей. Двумерное изображение рельефа показано на рис. 1 под каждой поверхностью изнашивания.

С помощью пакета «Анализ данных» в Microsoft Excel рассчитаны статистические характеристики высоты профиля y_i , представленные в табл. 2.

Среднее арифметическое R_a из отклонений профиля y_i в пределах базовой длины l , находится в пределах $R_a = 5–13$ мкм. Наименьшие показатели $R_a – 5,72$ и $6,67$ мкм соответствуют сталям 50Г и 25 после цементации и закалки от температуры 1000 °С и отпуска при 200 °С. Такие показатели объясняются оптимальной микроструктурой, состоящей из мартенсита, остаточного аустенита и карбидов [2; 6].

¹Исследования выполнены в Муроранском институте технологий, г. Муроран, Япония под руководством профессора Казумичи Шимизу

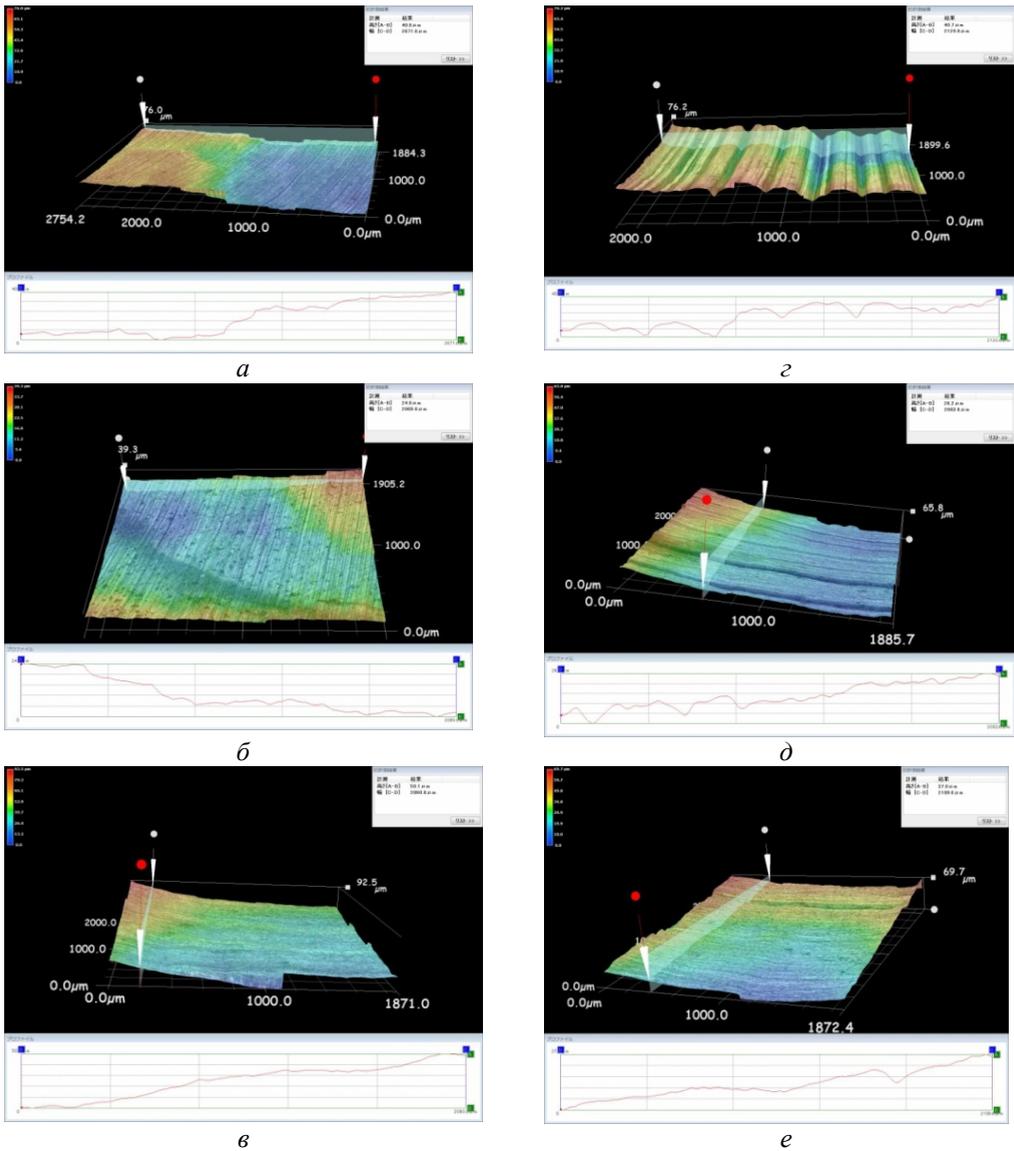


Рис. 1. Изношенные поверхности и профилограммы образцов из цементованных сталей 25 и 50Г после закалки от температуры 900 °С (а, з), 1000 °С (б, д) и отпуска при 200 °С; плазменной закалки при 1200-1400 °С (в, е); слева – сталь 25 (а, б, в), справа – 50Г (з, д, е).

Остаточный аустенит, образующийся в цементованной стали при последующей закалке, является метастабильным, так как в процессе абразивного воздействия претерпевает мартенситное $\gamma \rightarrow \alpha'$ превращение. На это указывают данные работ [9–12] и др. Это превращение вызывает дополнительное самоупрочнение поверхностного рабочего слоя в виду образования более дисперсного и более твердого мартенсита деформации. Само превращение сопровождается релаксацией микронапряжений. К тому же на развитие этого ДМПИ затрачивается дополнительная энергия абразивного воздействия, т.к. оно служит механизмом перераспределения энергетических затрат, увеличивая затраты на пластическую микродеформацию и разрушение [11; 12].

Таблиця 2

Результаты статистического анализа высотных показателей шероховатости сталей 25 и 50Г после цементации и закалки от различных температур

Статистическая характеристика	Сталь 25			Сталь 50Г		
	Режим упрочнения					
	3 900 °С + О 200 °С	3 1000 °С + О 200 °С	ПЗ 1200-1400 °С	3 900 °С+ О 200 °С	3 1000 °С + О 200 °С	ПЗ 1200-1400 °С
Среднее	13,30	6,76	13,25	9,86	5,72	7,63
Стандартная ошибка	0,08	0,08	0,14	0,08	0,06	0,09
Медиана	13,43	7,02	10,43	9,44	5,78	6,58
Мода	16,44	7,76	24,87	8,8	7,30	8,71
Стандартное отклонение	4,65	4,09	7,68	4,55	3,44	4,97
Дисперсия выборки	21,62	16,77	58,92	20,67	11,86	24,67
Эксцесс	0,07	-0,57	-1,26	-0,29	-0,73	-0,45
Асимметрия	-0,52	0,58	0,18	0,15	0,23	0,69
Интервал	22,43	15,12	25,1	21,49	14,24	19,83
Минимум	0,005	0,004	0,02	0,02	0,004	0,008
Максимум	22,44	15,12	25,12	21,51	14,24	19,84
Счет	3830	2968	3000	3042	2987	3024
Уровень надежности (95,0%)	0,15	0,15	0,28	0,16	0,12	0,18

Максимальные значения имеют место после цементации и закалки от 900 °С и отпуска при 200 °С, а также плазменной закалки от 1200-1400 °С. Нагрев стали при температуре 900 °С не обеспечивает полного растворения карбидов, наблюдается смешанная структура мартенсита и троостита и сетка вторичного цементита, что резко увеличивает хрупкость ($R_a \approx 13,3$ мкм, $R_a \approx 9,9$ мкм для стали 25 и 50Г, соответственно). После плазменной закалки стали от 1200–1400 °С износ образцов происходит неравномерно, есть сколы, резкие выступы и впадины, что негативно влияет на показатели шероховатости ($R_a \approx 13,3$ мкм, $R_a \approx 7,6$ мкм для стали 25 и 50Г, соответственно).

Для медианы наблюдается соотношение: $Me \approx y_{cp} \approx R_a$. Модальные значения для максимальных R_a существенно превосходят средние арифметические высот профиля, например, после плазменной закалки стали 25 $R_a = 13,25$; $Mo = 24,87$ мкм.

Чем меньше стандартная ошибка, тем более достоверной является оценка параметра. Что касается стандартного отклонения, то $\sigma_{max} = 7,68$ мкм получено для стали 25 после плазменной закалки от 1200-1400 °С.

Эксцесс E_x показывает «остроту пика» распределения. После всех вариантов термической обработки $E_x < 0$ свидетельствует о том, что распределение значений шероховатости плосковершинное, исключение составляет закалка от 900 °С и отпуск при 200 °С стали 25. Асимметрия $A_s > 0$ подтверждает несимметричность профиля изнашивания (правая ветвь длиннее). Минимальный высотный показатель шероховатости $y_{min} = 0,004$ мкм имеет место после закалки от 1000 °С и от-

пуска при 200 °С для обеих марок стали, а максимальный $y_{max}=25,12$ мкм – после закалки плазмой образцов из стали 25 при 1200-1400 °С. Этой же обработке соответствует максимальный интервал $I = y_{max} - y_{min}=25,12$. Следует отметить большой объем данных (~3000), взятых исследования и описания с помощью инструмента Описательная статистика пакета Анализ данных.

На рис. 2 показано сопоставление среднего арифметического отклонения профиля R_a и разности высот профиля ($A-B$) из профилограмм на рис. 1. Как видно, имеет место одинаковая тенденция изменения характеристик морфологии профиля изнашивания от режимов термического упрочнения: для стали 25 – $R_{a\ min}=6,8$ и $(A-B)_{\min} = 24,8$ мкм и для стали 50Г – $R_{a\ min}=5,7$ и $(A-B)_{\min} = 26,2$ мкм имеют место после цементации, закалки от 1000 °С и отпуска при 200 °С. Для параметров R_a и ($A-B$) имеет место тесная корреляционная взаимосвязь: величина коэффициента парной корреляции $r \geq 0,92 \approx 1$, а зависимости $R_a = f(A-B)$ хорошо аппроксимируются уравнениями линейного вида.

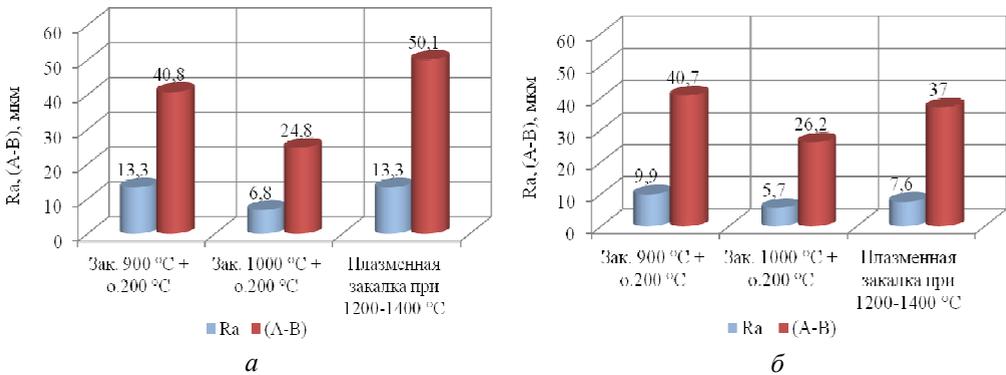


Рис. 2. Сравнение среднего арифметического отклонения профиля R_a и разности высот профиля ($A-B$) для сталей 25 (а) и 50Г (б) после цементации и закалки от различных температур

На рис. 3 представлено влияние температуры закалки на относительную износостойкость и шероховатость изношенной поверхности цементованных сталей 25 и 50Г. После цементации, закалки от 1000 °С и отпуска при 200 °С достигается максимальная износостойкость сталей 25 ($\epsilon_m=3,2$) и 50Г ($\epsilon_m = 4,2$). При этом максимальному коэффициенту относительной износостойкости ϵ_m соответствует минимальная величина шероховатости R_a и наоборот.

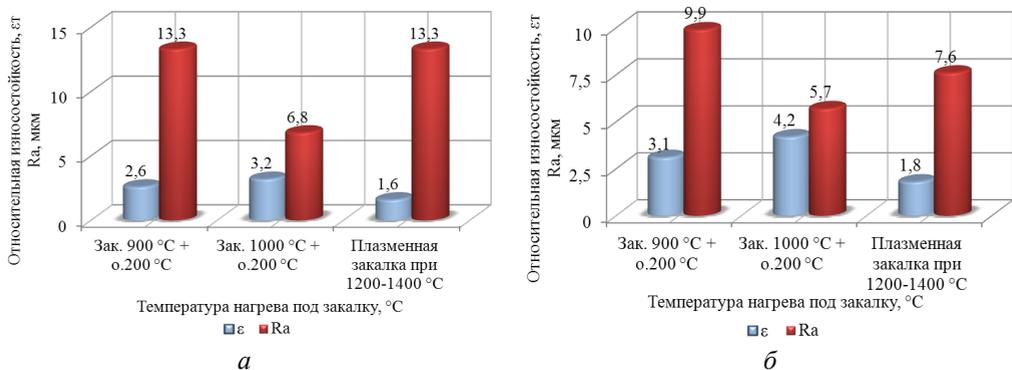


Рис. 3. Влияние температуры закалки на коэффициент относительной износостойкости ϵ_t и шероховатость поверхности R_a сталей 25 (а) и 50Г (б)

Выводы.

1. Применение статистического анализа, реализуемого с помощью пакета Анализ данных в Microsoft Excel, позволяет найти не только среднее значение высоты профиля R_a , но и другие важные характеристики шероховатости поверхности, учитывающие среднюю тенденцию ее изменения и разброс.

2. Для сталей 25 и 50Г установлена тесная ($r \approx 1$) корреляционная взаимосвязь между шероховатостью R_a и разностью высот профиля ($A-B$). Минимальные значения этих характеристик наблюдаются после цементации и закалки от 1000 °С.

3. Проведенные исследования показали, что после цементации, закалки от 1000 °С и отпуска при 200 °С достигается максимальная износостойкость сталей 25 и 50Г. Более высокой относительной износостойкости ε_r соответствует минимальная величина шероховатости поверхности R_a .

Список литературы

1. Рубан А.Р. Ограниченная выносливость цементуемых зубьев колес судовых редукторов / А.Р. Рубан // Вестник АГТУ. Сер.: Морская техника и технология. 2011. – № 1.

2. Влияние температуры закалки на состояние остаточного аустенита и абразивную износостойкость цементованной конструкционной стали 50Г / А.П. Чейлях [и др.] // Сб. научных трудов. Современные методы и технологии создания и обработки материалов Технологии и оборудования механической и физико-технической обработки. – Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2014. – С. 390–396.

3. Создание метастабильных состояний и повышение износостойкости хромистых инструментальных сталей плазменной и электронно-лучевой обработкам / В. В. Чигарев, И. И. Пирч, Я. А. Чейлях // Нові матеріали і технології в металургії та машинобуд. – 2008. – № 2. – С. 67–70.

4. Чейлях А.П. Влияние высокотемпературной термоциклической обработки на структуру и свойства цементованной стали 20ГЛ / А.П. Чейлях, Н.Е. Караваева // Университетская наука –2015: сб. тезисов докл. междунар. н.-т. конф. / ГВУЗ «ПГТУ». – Мариуполь, 2015. – С. 243–246.

5. Исследование возможности управления свойствами конструкционной стали способами поверхностного упрочнения / А.П. Чейлях, Н.Е. Караваева // Сб. научн. трудов. Строительство, материаловедение, машиностроение, Днепропетровск: ГВУЗ «ПГАСА», 2015. – Вып. 80. – С. 327–332.

6. Чейлях А.П. Рябикина М.А., Караваева Н.Е. Влияние закалки на структуру, состав метастабильного остаточного аустенита и абразивную износостойкость цементованных конструкционных сталей // Вісник Призовського державного технічного університету. Сер.: Технічні науки: Зб. наук. праць. – Маріуполь: ДВНЗ «Призов. держ. техн. ун-т», 2012. Вип. 25. – С. 95–101.

7. ГОСТ 25142-73. Шероховатость поверхности. Термины и определения.

8. Комбалов В.С. Влияние шероховатости твердых тел на трение и износ. – М.: Наука, 1974. – 112 с.

9. Малинов Л.С. Повышение абразивной износостойкости цементованных сталей 18ХГТ и 12ХНЗА за счет получения метастабильного аустенита / Л.С. Малинов, Е.Л. Малинова, Е.Я. Харланова // Металлы. – 1993. – № 2. – С. 108–111.

10. Геллер А.Л. Остаточный аустенит и износостойкость легированных цементованных сталей / А.Л. Геллер, В.Н. Юрко // Изв. ВУЗов. Черная металлургия. – 1991. – №6. – С. 66–69.

11. Попов В.С. Структурные изменения в нестабильно аустенитных сталях при абразивном изнашивании / В.С. Попов, Н.Н. Брыков // МиТОМ. – 1971. – № 9. – С. 54–55.

12. Чейлях А.П. Экономнолегированные метастабильные сплавы и упрочняющие технологии / А.П. Чейлях. – Мариуполь: издательство ПГТУ. – 2009. – 483 с.

13. Хусу А.П. Шероховатость поверхности (теоретико-вероятностный подход) / А.П. Хусу, Ю.Р. Виттенберг, В.А. Пальмов. –М.: Наука. 1975. –438с.

Стаття надійшла до редакції 17.11.2015.

Н. С. МАК-МАК, М. А. РЯБИКИНА, О. П. ЧЕЙЛЯХ

ВПЛИВ ЦЕМЕНТАЦІЇ І ГАРТУ ВІД РІЗНИХ ТЕМПЕРАТУР НА ЗНОСОСТІЙКІСТЬ І ШОРСТКІСТЬ ЗНОШЕНОЇ ПОВЕРХНІ КОНСТРУКЦІЙНИХ СТАЛЕЙ

Вивчено зносостійкість та морфологію поверхні зношування конструкційних сталей 25 і 50Г після цементациї і гарту від різних температур. Показана можливість застосування методів статистичного аналізу для оцінки шорсткості профілю. Встановлено взаємозв'язок коефіцієнта відносної зносостійкості з характеристиками профілю зношеної поверхні.

Ключові слова: шорсткість, математична статистика, цементация, абразивна зносостійкість, поверхню зносу.

N.E. MAK-MAK, M.A. RYABIKINA, A.P. CHEILIAKH

CARBURIZING AND HARDENING EFFECT FROM DIFFERENT TEMPERATURES FOR WEAR AND ROUGHNESS WORN SURFACE STRUCTURAL STEELS

The wear resistant and morphology of wear surface of 25 and 50Mn structural steels after carburizing and quenching from different temperatures was investigated. An opportunity of applying the methods of statistical and regression for evaluation of the profile roughness was shown. A correlation between the coefficient of relative durability and characteristics of the profile of worn out surface was found.

Keywords: roughness, mathematical statistics, carburization, abrasion resistance, wear surface.

Мак-Мак Наталя Євгенівна – майстер виробничого навчання кафедри металознавства та термічної обробки металів, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, Україна, @gmail.com, +38(098) 216 14 60

Рябікіна Марина Анатоліївна – канд. техн. наук, доцент кафедри металознавства та термічної обробки металів, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, Україна, maryna.ryabikina@mail.ru

Чейлях Олександр Петрович – д-р техн. наук, професор, проректор з науково-педагогічної роботи, завідувач кафедри металознавства та термічної обробки металів, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, Україна, cheylyakh_o_p@pstu.edu.