

## ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО РЕСУРСА РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Проанализированы факторы, снижающие эксплуатационный ресурс рабочих поверхностей например, стволов танковых пушек. Показана целесообразность применения лазерной термической обработки и лазерного легирования стали для значительного увеличения срока службы стволов.

**Ключевые слова:** живучесть, лазерные технологии

С выходом танков Украины на мировой рынок вооружений в целом подтвержден паритет отечественной техники по основным тактико-техническим показателям в сравнении с лучшими зарубежными образцами. В то же время проявилось отставание отечественных танковых пушек по живучести стволов, которая уступает зарубежным аналогам. По данным зарубежной печати живучесть стволов танковых пушек в настоящее время составляет не менее 500 выстрелов бронебойными подкалиберными снарядами (БПС). В то же время аналогичный показатель для отечественных пушек составляет до 200 выстрелов. Речь идет о гладкоствольной танковой пушке КБА-3 (далее - КБА-3), которой комплектуются отечественные боевые танки «Оплот» и Т80УД, разработанные в ХКБМ и серийно выпускаемые на Государственном Предприятии «Завод имени Малышева» (рис.1). Ее внешний вид приведен на рис.2, а технические характеристики – в табл.1.

Целью данной работы является исследование возможности повышения живучести изделия КБА-3.

Для достижения этой цели нами предложено применить технологии лазерной обработки поверхностей, которые на сегодняшний день признаны в качестве перспективных путей повышения эксплуатационного ресурса различного рода рабочих поверхностей [1].

Изучению живучести орудийных стволов посвящен целый ряд научно-исследовательских работ [2], в результате которых определено, что сокращение срока службы ствола происходит вследствие износа и разгара канала орудийного ствола. Под термином износ понимается механическое изменение в канале ствола, заключающееся в увеличении диаметра канала, а также в изменении профиля поперечного сечения канала ствола. Под термином разгар понимаются явления, вызванные эрозионным воздействием пороховых газов на поверхностные слои металла канала ствола.

На износ и разгар канала ствола в целом влияет достаточно большое количество факторов, основными из которых являются:

1. Высокие давления, достигающие в современных танковых пушках величины 700...750 МПа.
2. Высокая температура пороховых газов порядка 2500...3000°C.
3. Агрессивность продуктов сгорания пороховых газов по отношению к материалу ствола.
4. Физико-механические свойства материала орудийного ствола, его стойкость к воздействию продуктов сгорания порохового заряда.
5. Конструкция и материал обтюрирующих устройств снаряда.
6. Условия содержания ствола во время эксплуатации (своевременная промывка, чистка, смазка) и режим огня.



Рис.1. Отечественный боевой танк Т80УД



Рис.2. Внешний вид отечественной гладкоствольной танковой пушки КБА-3

Таблица 1. Технические характеристики танковой пушки.

Марка	КБА-3
Калибр	125 мм
Тип	гладкоствольная
Тип затвора	горизонтально-клиновой полуавтоматический

Полная длина пушки	6678 мм
Длина ствола	6000 мм (L48)
Нормальная длина отката	260...300 мм
Предельная длина отката (СТОП)	310 мм
Начальное давление в накатнике	59...62 кгс/см <sup>2</sup>
Количество тормозов откатных частей	2
Расположение тормозов откатных частей	симметричное относительно оси канала ствола
Количество накатников	1
Сила сопротивления откату	98000 кгс
Масса пушки	2500 кг
Масса откатных частей	1900 кг
Начальная (дульная) скорость (при стрельбе БПС ЗВБМ17 "Манго")	1700 м/с
Максимально допустимое расчетное давление газов в зарядной камере	6500 кгс/см <sup>2</sup>
Давление газов в зарядной камере (при стрельбе БПС ЗВБМ17 "Манго")	5660 кгс/см <sup>2</sup> (при t=15°C)
Рассеивание по горизонтали (БПС и КС на дальности 2000м)	0,2 т.д.
Рассеивание по вертикали (БПС и КС на дальности 2000м)	0,2 т.д.

В результате разгара и износа канала ствола происходит падение начальной скорости снаряда и ухудшение кучности стрельбы. После падения начальной скорости снаряда и ухудшения кучности стрельбы до определенных величин ствол становится непригодным для дальнейшего использования. Исследование механизма износа поверхности канала ствола показали, что износ гладких стволов современных танковых пушек в основном связан с пороховой эрозией, в результате которой разрушается поверхность канала ствола, и материал ствола выносится наружу. Величина износа канала ствола согласно экспериментальным данным неодинакова по его длине и в настоящее время не описана каким-либо приемлемым математическим выражением.

Практика показывает, что наибольший износ наблюдается в начале калиберной части ствола и снижается по мере продвижения к дульному срезу, в районе которого величина износа минимальна. Так, если принять износ в контрольном сечении ствола (850 мм от казенного среза) за 100%, то средние величины износа по длине ствола (начиная от казенного среза) составляют:

- 88% на расстоянии 1000 мм;
- 44% на расстоянии 2000 мм;
- 32% на расстоянии 3000 мм;
- 28,5% на расстоянии 4000 мм;
- 12,5% на расстоянии 5000 мм;
- 6% на расстоянии 6000 мм.

Если сравнить распределение износа с распределением давления по длине канала ствола, то зоне максимального износа соответствует зона максимального давления пороховых газов в канале ствола. Величина удельного износа в начале калиберной части канала ствола, в зависимости от индекса применяемых боеприпасов при стрельбе из отечественной танковой пушки, составляют 4...5 мкм на один выстрел для выстрелов осколочно-фугасными и кумулятивными и 13...23 мкм для выстрелов с бронебойными подкалиберными снарядами.

На сегодняшний день для изготовления ствола применяется конструкционная улучшаемая легированная сталь 38ХНЗМФА (табл.2). Сталь подвергают закалке при 820...850°C в масле и высокому отпуску при 550...600°C. После такой обработки структура стали – сорбит. Высокий отпуск создает наилучшее соотношение прочности и вязкости стали. В результате она имеет высокий предел текучести, малую чувствительность к концентраторам напряжений, высокий предел выносливости и достаточный запас вязкости. Этому способствует высокое содержание никеля. Молибден, присутствующий в стали, повышает ее теплоустойчивость. Согласно марочнику сталей [3] ее можно использовать при температурах до 400...450°C. Кроме этого, для стали 38ХНЗМФА характерна малая чувствительность к качеству поверхности и ударным нагрузкам. Недостатками этой стали являются трудность ее обработки резанием и большая склонность к образованию флокенов. При обнаружении их хотя бы в одной поковке бракуют все поковки данной плавки.

Таблица 2. Химический состав стали 38ХНЗМФА [3].

Химический элемент	C	Cr	Ni	Mo	V	Cu	Si	Mn	S	P
масса (%)	0,33-0,40	1,2-1,5	3,0-3,5	0,35-0,45	0,10-0,18	≤0,3	0,17-0,37	0,25-0,50	≤0,025	≤0,025

В настоящее время установлено, что отечественные и зарубежные оружейные стали имеют практически одинаковый химический состав и физико-механические свойства, и не способны противостоять пороховой эрозии. Предполагается, что в танковых пушках зарубежного производства применяется защитное покрытие канала ствола. Наиболее распространенным является хромовое покрытие.

Следовательно, для решения задачи повышения живучести изделия КБА-3 целесообразно применение таких способов лазерной обработки поверхности, которые приведут к ее направленным структурным и/или химическим изменениям.

В ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины проводились исследования по лазерной термической обработке (ЛТО) внутренней поверхности трубчатых образцов из стали 38ХНЗМФА [4]. Для этого на предварительно шлифованную упрочняемую поверхность образцов-имитаторов ствола для улучшения поглощающей способности методом холодного химического травления наносили покрытие  $Zn_3(PO_4)_2$ . Затем сталь 38ХНЗМФА упрочняли на глубину 0,7...0,8 дорожкой шириной порядка 6 мм методом ЛТО без оплавления (рис.3,а) и на глубину до 1,0 мм по спирали дорожкой шириной 9 мм методом ЛТО с оплавлением (рис.3,б). Во всех случаях расстояние между витками спиральной дорожки составляло 1-2 мм. Поскольку припуск под финишное круглое шлифование упрочненных шеек составлял 0,1 мм на сторону, то с целью повышения стабильности процесса ЛТО допустили наличие зоны оплавления до 0,1 мм в глубину. Ожидалось, что твердость дорожек составит HRC 54-59 при твердости основного металла HRC 40-45 [5]. На стали 25Х1М1ФТР требовалось получить поверхностный слой глубиной не менее 0,5 мм, твердостью не ниже HRC 48 при твердости основного металла HRC 20-23. Был принят вариант ЛТО с полным переплавом на такую глубину.

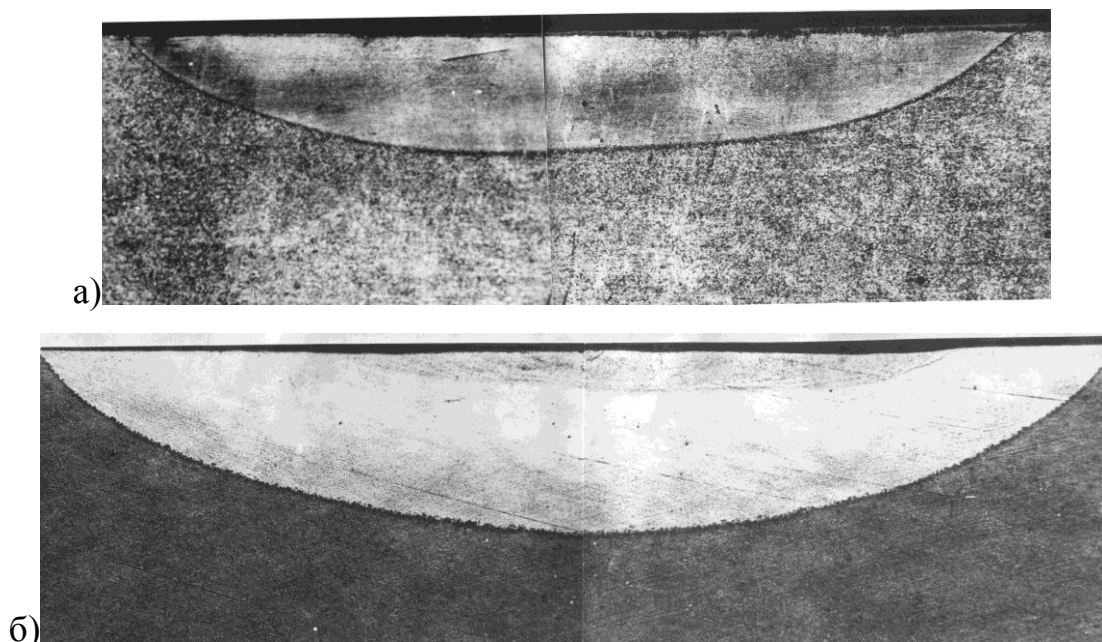


Рис.3. Структура дорожек ЛТО стали 38ХНЗМФА:  
а - без оплавления; б - с оплавлением

В результате проведения ЛТО образцов из стали 38ХНЗМФА был выбран следующий режим: мощность излучения CO<sub>2</sub>-лазера P=3,2 кВт, скорость обработки V=16,67 мм/с, диаметр пятна излучения на обрабатываемой поверхности d=8 мм. Установлено, что основной металл имеет бейнитную структуру (в основном нижнего бейнита) с характерными полосамиковки. Его твердость составляет порядка HRC 43. Структура оплавленной зоны (ширина 5-6 мм при глубине 70-100 мкм) четко выраженная дендритная. В ней могут образовываться микротрещины шириной 10-20 мкм, которые остаются в пределах литой зоны и не распространяются в область зоны закалки из твердой фазы, что позволяет устранять их вместе с припуском при финишной механической обработке. Зона закалки из твердой фазы представляет собой бесструктурный (реже – мелкоигльчатый) мартенсит с однородной твердостью HRC 65-66. Между этой зоной и основным металлом имеется переходная зона шириной 40-60 мкм с плавным падением твердости.

Наличие микротрещин в литой зоне указывает на действие временных термических напряжений в процессе ЛТО. На установке ДРОН-3 в образцах измерялись напряжения первого рода (зональные макронапряжения) методом рентгеноструктурного анализа [6]. Определили, что на поверхности дорожек ЛТО без оплавления имеют место сжимающие напряжения  $\sigma = -763 \text{ МПа} \pm 380 \text{ МПа}$ . По сравнению с пределом прочности эти напряжения значительны и в сочетании с циклическими знакопеременными нагрузками, характерными для условий работы ствола, могут привести к снижению его живучести. В оплавленной (литой) зоне дорожек ЛТО остаточные напряжения не обнаружены. Объемная термообработка образцов из стали 38ХНЗМФА после ЛТО, включающая в себя нагрев до 220...250°C, выдержку в течении 3-4 ч и последующее охлаждение на воздухе, позволяет полностью устранить остаточные напряжения. При этом твердость закаленной методом ЛТО стали понижается до HRC ~60.

По разработанной технологии ЛТО в ИЭС им. Е.О. Патона была изготовлена небольшая опытная партия изделий КБА-3, переданная для проведения испытаний на ГП «Завод имени Малышева» (г. Харьков). Испытания показали повышение стойкости стволов к износу от выстрелов бронебойными подкалиберными снарядами примерно на 30%. Дальнейшие исследования отстрелянных стволов показали, что в процессе функционирования дорожки ЛТО разупрочняются согласно механизму термического отпуска. Это происходило потому, что сталь 38ХНЗМФА имеет сравнительно низкую

жаростойкость. Также было установлено, что упрочненный ЛТО слой высокой твердости оказался практически не стойким к пороховой эрозии.

Таким образом, было еще раз подтверждено, что основным фактором, влияющим на живучесть ствола, является пороховая эрозия. Следовательно, для повышения живучести ствола необходимо вносить изменения не только в структуру и фазовый состав материала канала ствола изделия КБА-3, но и в его химический состав. Целью последних изменений должно быть повышение жаропрочности изделия, т.е. способности выдерживать механические нагрузки, без существенных деформаций не разрушаясь при повышенных температурах.

Технологией, которая позволяет локально изменять фазовый и химический состав металлической поверхности является лазерное легирование. Оно заключается в локальном расплавлении основного металла при помощи сфокусированного лазерного излучения с последующим внесением в расплав присадочного материала.

В ИЭС им. Е.О. Патона были проведены исследования по лазерному легированию образцов из стали 38ХНЗМФА [7]. Наносили легированный слой в виде дорожки шириной 5 мм и глубиной 1,0-1,5 мм, идущей по спирали с шагом между витками 1-2 мм. В связи со значительной шириной дорожки и мощностью излучения CO<sub>2</sub>-лазера P=5 кВт, скорость легирования лежала в пределах 20-40 м/ч. При выборе присадочного материала, удовлетворяющего техническим требованиям, рассматривали порошки самофлюсующихся сплавов ПГ-12Н-01, ПГ-12Н-02, ПГ-Н1, ПГ-АН6, ПГ-10Н-04, хастелоя (грануляция 50-160 мкм), механические смеси порошков ПГ-АН6 и ПГ-10Н-04 с ВК6, нитридом титана, хромом, Релитом, а также их комбинации.

Во всех случаях лазерного легирования, из-за сравнительно низких скоростей процесса, наблюдалась значительная ЗТВ (100...200% от глубины легированного слоя). Для выбранного класса сталей она представляет собой мелкоигольчатый мартенсит с твердостью HV10-5800...6700 МПа. В дорожках легирования в значительном количестве (30...40%) присутствует  $\alpha$  и  $\gamma$  железо (т.е. мартенситная и ферритная фазы). Структура легированного слоя в нижней части (возле основного металла) представляла собой сравнительно мелкодисперсные кристаллиты, ориентированные перпендикулярно переходной зоне. В верхней части легированного слоя наблюдается сравнительно равновесная мелкодисперсная структура.

Характерный дефект легированного слоя – микротрещины. Во всех случаях легирования порошками сплавов системы Ni-Cr-B-Si причинной их возникновения можно считать наличие хрупкой эвтектики, образующейся по границам зерен. Наиболее вероятно, что это бориды или силициды. Кроме того, причинной возникновения трещин могут быть высокие временные напряжения, возникающие в связи с объемным эффектом быстрого образования мартенсита при охлаждении расплавленного участка металла до температур порядка 300°C.

С целью устранения трещинообразования применялся сопутствующий высокочастотный (ВЧ) подогрев цилиндрических образцов до поверхностных температур порядка 800°C. При этом скорости легирования значительно возрастают (с 20...40 м/ч до 160...180 м/ч), а мощность лазерного излучения снижается до 3 кВт.

Лазерное легирование с ВЧ-подогревом проводили порошком ПГ-Н1 сплава системы Fe-Ni-B-Si. Твердость полученного слоя составляла HRC 20...40, в то время как паспортная твердость использованного сплава HRC 50...55. Глубина легированного слоя составляла 0,5 мм. Характерные для обычного лазерного легирования микротрещины отсутствовали. Микроструктура легированного слоя близка к структуре слоев лазерной наплавки с последующим высоким отпуском: имеет ярко выраженный дендритный характер, наблюдаются крупные дендриты. Переходная зона составила 5-8 мкм (рис.4).

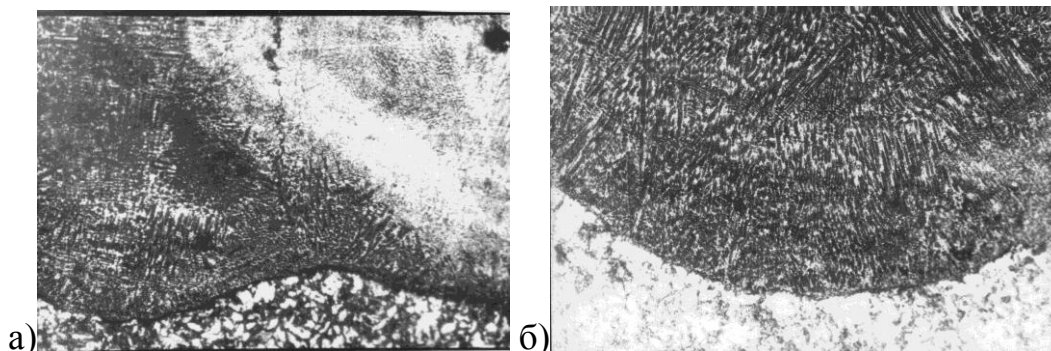
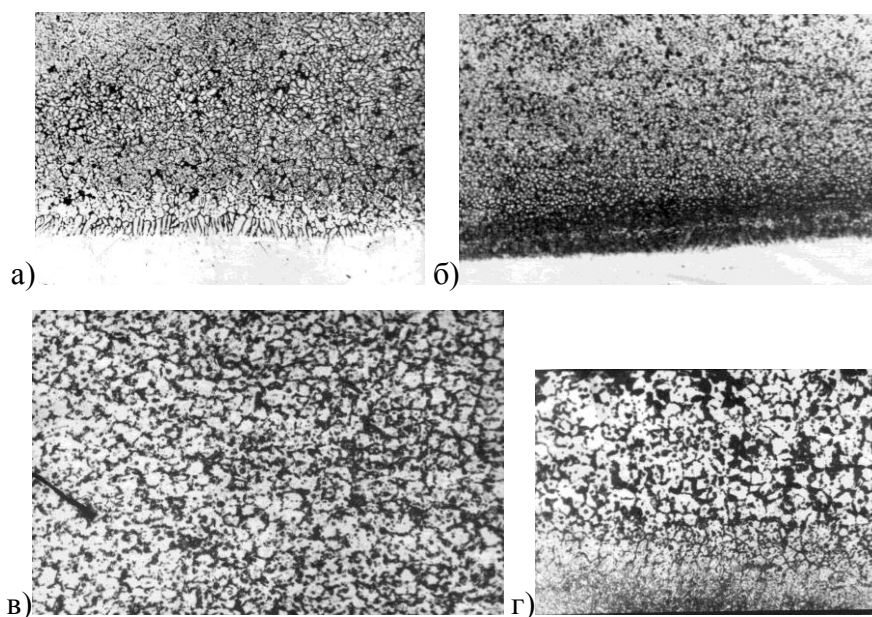


Рис.4. Микроструктуры лазерного легирования стали 38ХН3МФА порошком ПГ-Н1 (P=3 кВт, V=170 м/ч, d=3 мм) с сопутствующим подогревом током высокой частоты (440 кГц):  
а - до ~ 400°C, ×156; б - до ~ 800°C, ×200

Эксперименты по подбору химического состава присадочного материала показали, что легирование порошками самофлюсующихся NiCrBSi-сплавов (например, ПГ-Н1, ПГ-АН3, ПГ-АН6, ПГ-12Н-02, ПГ-10Н-01), дает незначительное (до 10%) повышение износостойкости в сочетании с жаростойкостью до 700...800°C°. Твердость легированных слоев зависит от исходной твердости присадочного материала и составляет HRC 50...55 для материалов с твердостью HRC 50...65. С целью повышения износостойкости и жаростойкости исследовали легирование хромом. Износостойкость при этом повысилась в четыре раза. Твердость полученных слоев составила около HRC36. Было установлено, что высокую износостойкость и жаростойкость обеспечивают смеси порошков хрома и Релита или хрома и карбида вольфрама ВК6 (рис.5) в соответствующем соотношении. Лучшие результаты показала смесь хрома и Релита. Легирование такой смесью рассмотренных сталей позволяет увеличить их износостойкость на порядок. Твердость полученных слоев – HRC 50...56, их глубина – 1,0...1,5 мм при ширине дорожки 5 мм (дорожки легирования наносили по спирали с шагом 1,0...1,5 мм). Жаростойкость легированных таким образом слоев – порядка 1000... 1100°C.

По результатам работы можно сделать следующие выводы:

1. Проанализированы причины, вызывающие сокращение срока службы изделия КБА-3. Предложено использование процессов лазерной обработки поверхности для повышения живучести орудийных стволов.



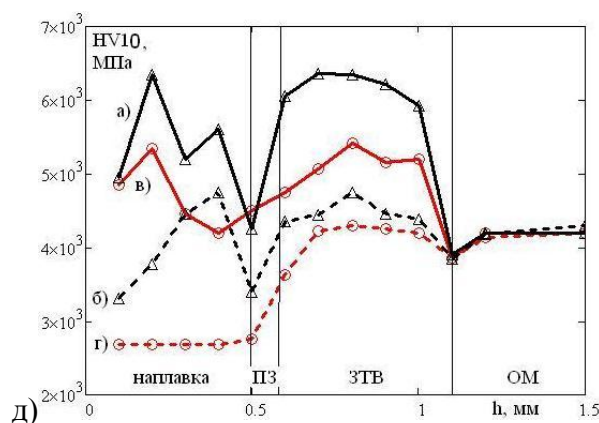


Рис.5. Результати випробування на жаростійкість наплавлених на сталь 38ХНЗМФА шарів (випробування 6 годин при 1200°C): а – 50%Cr+50%ВК6 до випробування,  $\times 200$ ; б – то ж саме після випробування,  $\times 200$ ; в – 50%Cr+50%Релит до випробування,  $\times 500$ ; г – то ж саме після випробування,  $\times 500$ ; д – відповідні розподіли мікротвердості HV10 [МПа]

2. Установлено, що розроблена технологія ЛТО сталі 38ХНЗМФА з мінімальним оплавленням поверхні здатна підвищити її твердість, однак не підвищує стійкість до порохової ерозії. Випробування експериментальної партії виробів КБА-3 показали підвищення стійкості стволів до зносу від вистрелів бронебойними підкалібрними снарядами приблизно на 30%.

3. Дослідження показали, що при лазерному легированні сталі 38ХНЗМФА може виникати дефект у вигляді мікротріщин у отримуваних дорожках. Для їх усунення необхідно попередній або супутюючий підогрів оброблюваної деталі. Хороші результати дає супутюючий ВЧ-підогрів до температур порядку 800°C. Крім усунення тріщиноутворення, ВЧ-підогрів дозволяє в 3-5 разів підвищити лінійну швидкість процесу.

4. Проведені лабораторні дослідження процесу лазерного легировання сталі 38ХНЗМФА сумішшю порошків хрому та Реліта показали, що стійкість до сухого тертя скольження оброблених поверхонь підвищується в 3-5 разів, а їх жаростійкість зростає з 400 до  $\sim 1000^\circ\text{C}$ . Особливості отримуваних при цьому структур легированих шарів дозволяють говорити про те, що такий комбінований процес може представляти інтерес як спосіб підвищення живучості рушійних стволів.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Девойно О.Г. Технологія формування зносостійких поверхонь лазерним легированієм / О.Г. Девойно. – Мн.: УП "Технопринт", 2001. – 178 с.: іл.
2. Орлов Б.В. Устрійство і проектування стволів артилерійських озброєнь / Б.В. Орлов, Э.К. Ларман, В.Г. Маликов. – М.: Машиностроєння, 1976. – 432 с.
3. Марочник сталей і сплавів / В.Г.Сорокін, А.В.Волоснікова, С.А.Вяткін і др.; Під заг. ред. В.Г.Сорокіна. – М.: Машиностроєння, 1989. – 640 с.
4. Хаскін В.Ю. Лазерне термоупрочнення комплексно легированих сталей / Хаскін В.Ю., Бернацкий А.В., Сиора А.В. // Процеси лиття. – 2003. – №3 – С. 93-95.
5. Упрочнення деталей лучом лазера / Під заг. ред. В.С.Коваленко // В.С. Коваленко, Л.Ф. Головка, Г.В. Меркулов і др. – Київ: Техніка, 1981. – 131 с.
6. Горелик С.С. Рентгенографічний і електроннографічний аналіз металів / С.С. Горелик, Л.Н. Расторгуєв, Ю.А. Скаков. – Москва: Металлургиздат, 1963. – 256 с.
7. Розробка технологічних прийомів лазерного упрочнення поверхневих шарів деталей зі сталі 38ХНЗМФА / Шелягін В.Д., Хаскін В.Ю., Бернацкий А.В., Сиора А.В. // Вісник двигунобудування. – 2008 – №2(19). – С. 94-97.

Надійшла: 12.11.2013 р

Рецензент: д.т.н., проф. Щербак Л.М.