

МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.373.826

О. Н. Войтович, И. О. Соколов

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОЙ ТЕРМООБРАБОТКИ НА СВОЙСТВА УПРОЧНЕННЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ

UDC 621.373.826

O. N. Voitovich, I. O. Sokorov

THE RESEARCH INTO THE INFLUENCE OF LASER THERMAL PROCESSING PARAMETERS ON THE PROPERTIES OF STRENGTHENED SURFACE LAYERS

Аннотация

Представлены результаты исследований влияния процесса лазерной обработки на микроструктуру и распределение элементов между различными структурными составляющими, а также на формирование зоны термического влияния.

Полученные данные о распределении микротвердости в упрочненных слоях и их износостойкости в зависимости от режимов лазерной обработки позволяют управлять процессами, протекающими при упрочнении, и, как следствие, уровнем механических свойств поверхностных слоев путем изменения режимов лазерной обработки.

Ключевые слова:

микротвердость, износостойкость, лазерная обработка, термоупрочнение, микроструктура, лазерное легирование, лазерная закалка, изнашивание, чугуны.

Abstract

The paper presents the results of studies of the effect of laser processing on the microstructure and distribution of elements between various structural components, as well as on the formation of the heat affected zone. The obtained data on the distribution of microhardness in strengthened layers and their wear resistance depending on the modes of laser processing allow monitoring the processes taking place during strengthening and, as a consequence, the level of mechanical properties of surface layers by changing the conditions of laser processing.

Key words:

microhardness, wear resistance, laser processing, thermal strengthening, microstructure, laser alloying, laser hardening, wear, cast iron.

Введение

В настоящее время существует целый ряд разнообразных способов повышения долговечности деталей машин. Наряду с традиционными методами поверхностного упрочнения, такими как термическая, химико-термическая наплавка, напыление, все более широкое

распространение находят технологии с использованием концентрированных источников энергии, например, лазерного луча.

Применяются методы лазерного легирования, предполагающие изменение химического состава поверхностного слоя за счет «вплавления» в обрабатываемую поверхность легирующих компонентов. В этом случае гибкость

технологического процесса обеспечивается как варьированием химического состава поверхностного слоя, так и изменением режимов лазерной обработки.

Поэтому разработка технологий с использованием лазерных источников энергии, направленных на создание поверхностного слоя с высокими эксплуатационными свойствами, является важной прикладной народно-хозяйственной проблемой. Однако технологический процесс лазерной обработки в промышленности не широко применяем. Это объясняется, во-первых, экономическими трудностями предприятия, на которых целесообразно их внедрение, во-вторых, недостаточной изученностью технологии получения покрытий и вопросов их эксплуатационных свойств для различных условий работы.

Особенности строения и структуры чугунов при лазерной закалке

Поскольку при лазерной обработке различные слои нагреваются до разных температур, зоны лазерного воздействия (ЗЛВ) имеют слоистое строение. Рассмотрим строение ЗЛВ после лазерной закалки чугунов. По результатам измерения микротвердости и исследования микроструктуры по глубине ЗЛВ сталей существуют в общем случае три принципиально различных по природе фазовых превращения слоя.

Первый слой – зона оплавления. Слой получают при закалке из расплавленного чугуна. В большинстве случаев слой имеет столбчатое строение, причем кристаллы вытянуты в направлении теплоотвода. Основная структурная составляющая – мартенсит. Карбиды при этом обычно растворяются.

Второй слой – зона закалки из твердой фазы чугуна. Слой получают полной и неполной закалкой. Он отличается большой неоднородностью по глубине: ближе к поверхности – мартенсит и остаточный аустенит, образованные при охлаждении из области го-

могенного аустенита, ближе к исходному металлу – структуры, полученные из области негомогенного аустенита при охлаждении. В слое, наряду с мартенситом, присутствуют элементы исходной структуры: феррит в доэвтектоидной и цементит в заэвтектоидной стали.

Второй и третий слои образуют зону термического влияния (ЗТВ).

В микроструктуре чугуна после обработки непрерывным CO_2 -лазером выделяются зона оплавления и зона закалки из твердой фазы чугуна (рис. 1).

Третий слой – переходная зона (зона отпуска), зона термического влияния. В чугунах слой выявляется редко. Он состоит лишь из зоны закалки из твердой фазы чугуна. При обработке с оплавлением графит растворяется в расплаве и после охлаждения в зоне оплавления (ЗО) формируется структура белого чугуна, т. е. затвердевание идет по метастабильной диаграмме железо–углерод без выделения свободного графита. Высокая скорость охлаждения может приводить к отклонению от общей закономерности кристаллизации белых чугунов.

В доэвтектическом белом чугуне кристаллизация начинается с выделения первичных зерен аустенита, а затем при температуре 1147°C образуется эвтектика – ледебурит. В структуре ЗО (см. рис. 1) трудно выделить избыточные зерна аустенита; в ней имеется мелкодисперсная смесь аустенита и цементита, имеющая дендритное строение. Очевидно, из-за высокой скорости охлаждения кристаллизация избыточного аустенита подавляется и весь расплав затвердевает квазиэвтектически с образованием квазиледебурита. Квазиэвтектической кристаллизации доэвтектических чугунов способствует выравнивание концентрации кремния в зоне оплавления, а это приводит к смещению эвтектической точки на диаграмме влево (рис. 2).



Рис. 1. Микроструктура чугуна после обработки непрерывным CO_2 -лазером ($\times 300$)

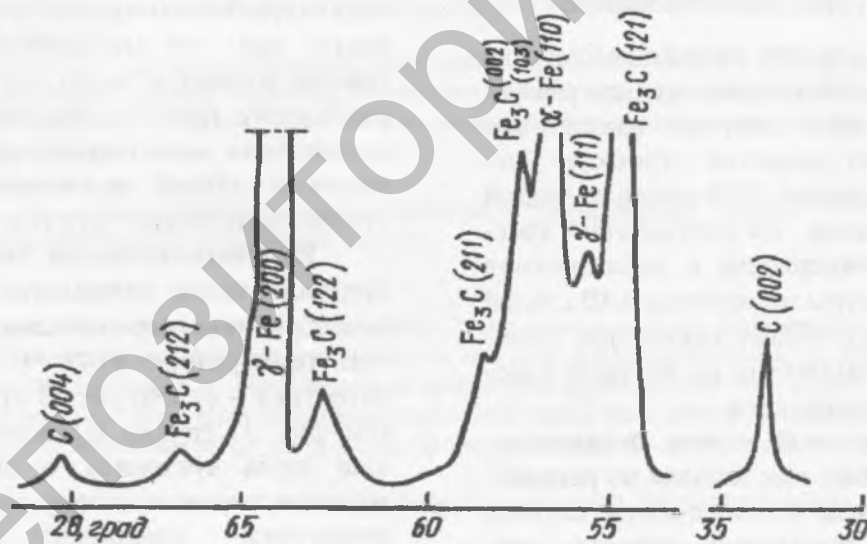


Рис. 2. Рентгенограмма зоны оплавления чугуна после обработки непрерывным CO_2 -лазером

На рис. 2 приведена рентгенограмма зоны оплавления серого чугуна после обработки непрерывным CO_2 -лазером. На ней имеются линии $\gamma\text{-Fe}$, Fe_3C , $\alpha\text{-Fe}$ и C . Анализ рентгенограммы показывает, что количество аустенита колеблется в пределах 25...65 %, цементита – 10...45 %, $\alpha\text{-Fe}$ – 5...50 %, причем

с увеличением скорости обработки количество $\alpha\text{-Fe}$ увеличивается, а $\gamma\text{-Fe}$ уменьшается. Наличие $\alpha\text{-Fe}$ в ЗЛВ можно объяснить тем, что аустенит в процессе закалки частично превращается в мартенсит. Присутствие графита в ЗО обусловлено неполным его растворением, а также всплытием из нижних слоев

и образованием включений и пор у самой поверхности. Наличие пор объясняется выделением газа, адсорбированного на графите. Наибольшее их количество образуется при высоких скорости обработки и плотности мощности излучения.

Для уменьшения порообразования в ряде случаев рекомендуется предварительное вакуумирование деталей перед лазерной обработкой, в результате которого уменьшается количество газа, сорбированного графитом, однако оно значительно усложняет процесс. Более простым приемом является понижение плотности мощности излучения и скорости обработки. В этом случае также предотвращается образование трещин – распространенного вида дефектов при

обработке с оплавлением. Но при глубине оплавленного слоя более 0,5 мм трещинообразование в чугунах опять может возрастать даже при малой скорости обработки.

Таким образом, упрочнение чугунов с оплавлением при высоких плотности мощности излучения и скорости обработки не рекомендуется.

Методика исследования

Для термоупрочнения были изготовлены образцы из высокопрочного чугуна ВЧ 50. В табл. 1 представлены два режима лазерной обработки, на рис. 3 – схема лазерной установки, с помощью которой упрочнены образцы.

Табл. 1. Режимы лазерной закалки

Номер образца	V , мм/мин	Плотность мощности, кВт/мм ²	Коэффициент перекрытия	Диаметр пятна, мм
1	50	1,57	0,35	2,5
2	100			

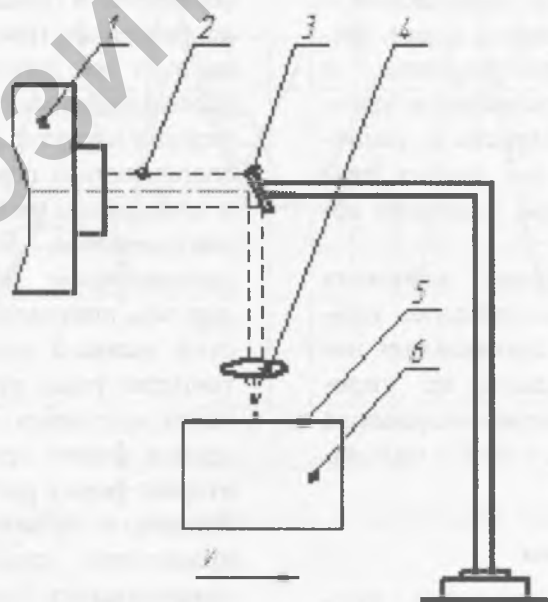


Рис. 3. Схема лазерной установки: 1 – разрядная трубка; 2 – лазерный луч; 3 – поворотная оптика; 4 – фокусирующая оптика; 5 – упрочненная поверхность; 6 – деталь

Большой интерес представляет анализ физико-механических свойств и микроструктуры поверхности на нижней границе зоны оплавления, граничащей с зоной термического влияния, необходимый для оценки износостойких свойств металла в случае изнашивания поверхности, когда износ упрочненной поверхности приближается к критическому предельному состоянию и за этим наступает ускоренный износ металла на участках с пониженными значениями прочностных и износостойких свойств.

Основным физико-механическим свойством упрочненного слоя, определяющим его эксплуатационные харак-

теристики (в первую очередь износостойкость), является микротвердость. Метод определения микротвердости предназначен для оценки твердости очень малых объемов материалов, в частности – и это главное – для оценки твердости отдельных фаз или структурных составляющих сплавов, а также разницы в твердости отдельных участков этих составляющих.

Испытания микротвердости производились при помощи микротвердомера ПМТ-3 методом восстановленного отпечатка по стандартной методике (табл. 2) при величине статической нагрузки $P = 0,981 \text{ Н}$ (100 г).

Табл. 2. Режимы нагружения

Номер образца	Нагрузка P , кН	Скорость V , м/с	Длительность, мин
1 (незакаленный)	6 (9)	1,8	50
2.1 ($V = 50 \text{ мм/мин}$)			
2.2 ($V = 100 \text{ мм/мин}$)			

Процесс изнашивания определяется большим количеством взаимовлияющих факторов, таких как химический и фазовый состав упрочненных слоев, физико-механические характеристики и микротопография поверхностного слоя, контактная нагрузка, скорость и температура в зоне трения и ряд других, связанных с влиянием среды, наличием абразивных частиц и т. д.

Выявление наиболее значимых факторов требует моделирования процесса. На данном этапе проводились испытания экспресс-методами по упрощенным схемам на установке торцового трения: «диск – втулка», «диск – пальчиковые образцы» (рис. 4).

Результаты

Измерения микротвердости проводились на поверхности дорожек лазерной закалки в продольном и поперечном направлениях. На основании

полученных данных были построены графики распределения микротвердости поверхности в продольном и поперечном направлениях (рис. 5 и 6). Одновременно на этих же дорожках были выполнены исследования микроструктуры. Проанализирован характер изменения структурных составляющих поверхности в продольном и поперечном направлениях дорожек термоупрочнения. Было установлено, что распределение микротвердости поперек дорожек повторяет профиль теплофизических условий нагрева и распределения температурных полей и плотности мощности излучения в пятне нагрева. Полученная форма кривых приблизительно повторяет форму распределения температур, близкую к гауссовскому. Для такого распределения характерно формирование максимальных значений микротвердости в центре зоны с уменьшением твердости к краям кривой распределения температурных полей.

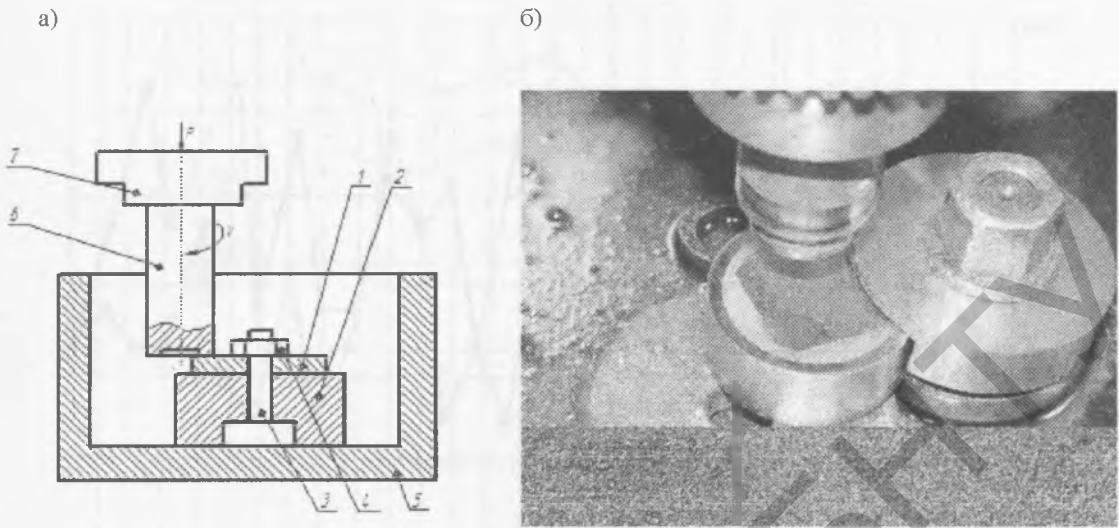


Рис. 4. Схема (а) и фотография (б) установки для проведения испытаний износостойкости образцов: 1 – образец; 2 – подставка; 3 – шилка; 4 – фиксирующая гайка; 5 – емкость; 6 – контртело; 7 – патрон

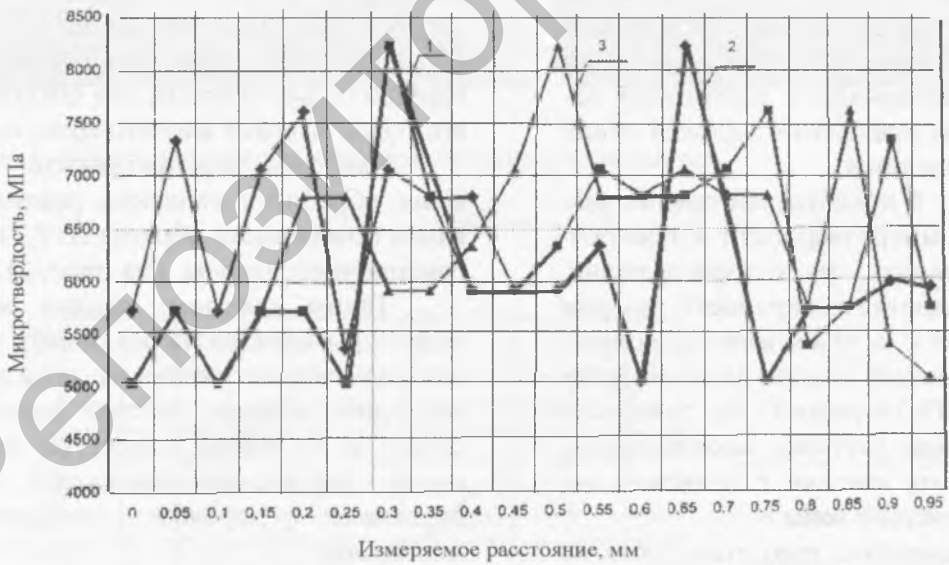


Рис. 5. График распределения микротвердости в продольном направлении: 1 – незакаленный; 2 – $V=50$ мм/мин; 3 – $V=100$ мм/мин

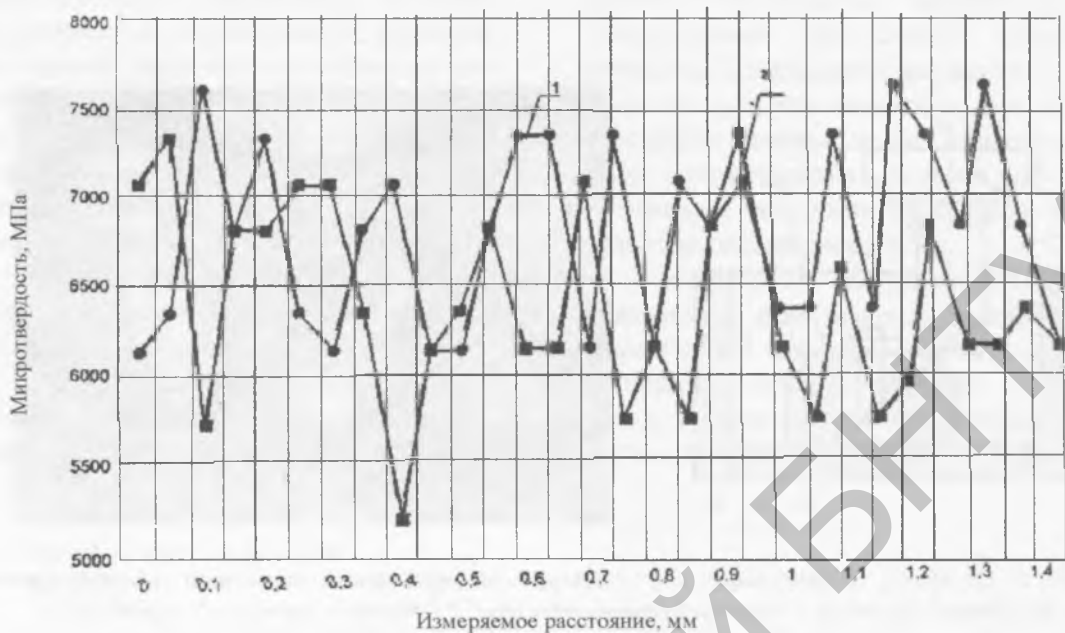


Рис. 6. График распределения микротвердости в поперечном направлении: 1 – $V = 50$ мм/мин; 2 – $V = 100$ мм/мин

Анализ микроструктуры металла на различных участках зон термоупрочнения показывает, что в центральных участках дорожки и ближе к ее краям структура поверхности достаточно однородна, а за пределами дорожки существенно изменяется.

На рис. 6 представлен график распределения микротвердости в поперечном направлении, из которого видно, что при обработке поверхности лазером при скорости $V = 50$ мм/мин наблюдается максимальный скачок микротвердости (7200 МПа) и резкий спад твердости с увеличением глубины проплавления. Возможно, это связано с отпуском соседней закаленной зоны.

Распределение микротвердости по глубине закаленной поверхности представлено на рис. 7.

Проводились испытания на износостойкость (рис. 8). В первом опыте к образцам прикладывалась сила в 6 кН, во втором к аналогичным образцам –

сила в 9 кН. На графиках (рис. 9 и 10) видно, что образец, закаленный при скорости перемещения лазерного луча $V = 100$ мм/мин, сопротивляется износу гораздо большее время, что объясняется его более высокой микротвердостью.

Наиболее перспективными режимами обработки являются режимы закалки поверхности образца № 2.2 из высокопрочного чугуна (см. табл. 2).

Таким образом, анализ микроструктуры металла на различных участках зон термоупрочнения показывает, что в центральных участках дорожки и ближе к ее краям структура поверхности достаточно однородна, а за пределами дорожки существенно изменяется.

Установлено, что при обработке поверхности лазером при скорости $V = 50$ мм/мин наблюдается максимальный скачок микротвердости (7200 МПа) и резкий спад твердости с увеличением глубины проплавления.

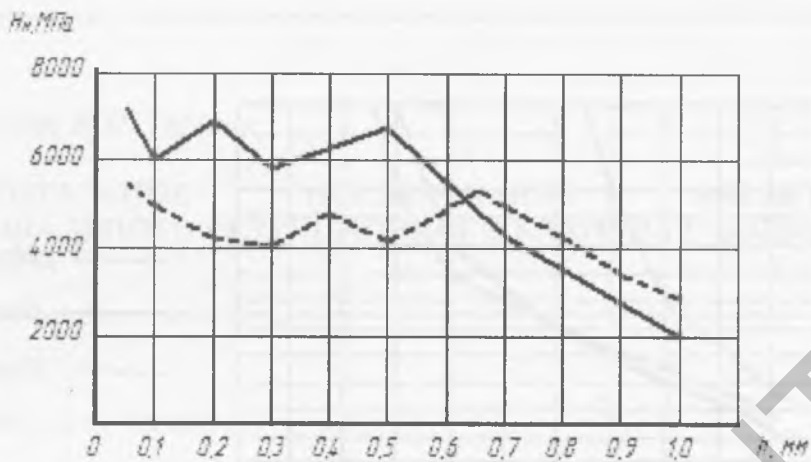


Рис. 7. Распределение микротвердости по глубине закаленной поверхности



Рис. 8. Фотографии образцов после испытания на износостойкость

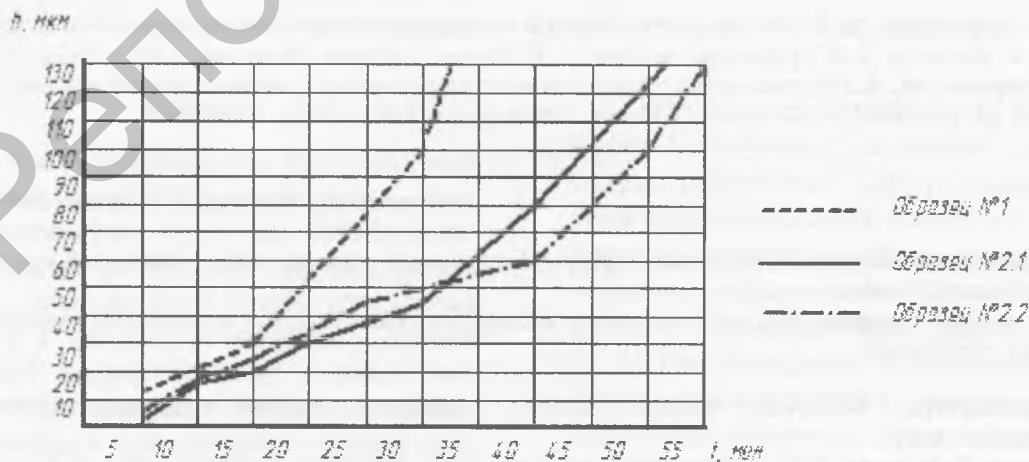


Рис. 9. График изменения износостойкости поверхностей образцов за период времени под действием нагрузки 6 кН

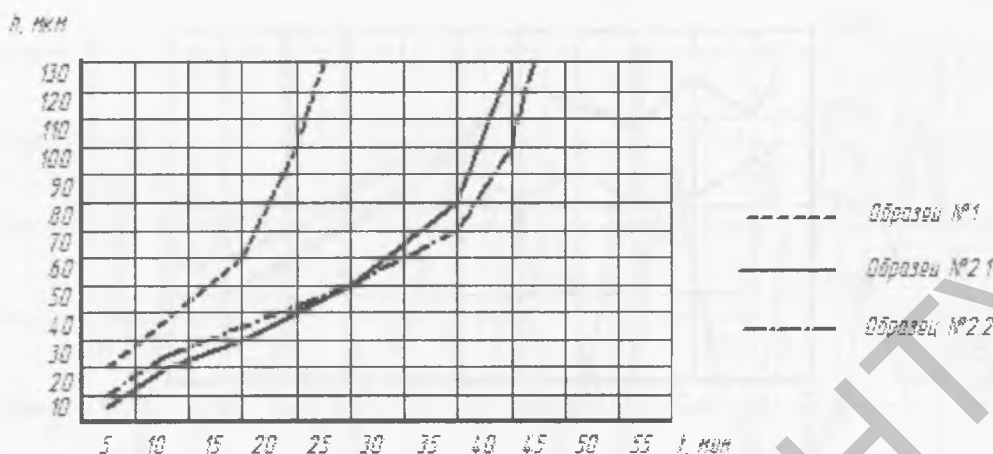


Рис. 10. График изменения износостойкости поверхностей образцов за период времени под действием нагрузки 9 кН

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорьянц, А. Г. Методы поверхностной лазерной обработки : учеб. пособие для вузов / А. Г. Григорьянц, А. Н. Сафонов ; под ред. А. Г. Григорьянца. – М. : Высш. шк., 1987. – 191 с. : ил.
2. Григорьянц, А. Г. Основы лазерной обработки материалов / А. Г. Григорьянц. – М. : Машиностроение, 1989. – 304 с. : ил.
3. Ляхович, Л. С. Химико-термическая обработка материалов / Л. С. Ляхович. – Минск : Наука и техника, 1977. – 272 с.
4. Девоино, О. Г. Разработка многоцелевого программного обеспечения для исследований в области материаловедения / О. Г. Девоино, Г. Г. Панич, М. А. Кардаполова // Передовые технологии в производстве материалов и восстановлении изношенных поверхностей : материалы 2-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 24–25 марта 1997 г. – Минск : БНТУ, 1997. – С. 121–122.
5. Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия / Я. С. Уманский [и др.]. – М. : Металлургия, 1982. – 632 с.
6. Методы исследований материалов: структура, свойства и процессы нанесения неорганических покрытий / Л. И. Гушинский [и др.]. – М. : Мир, 2004. – 384 с. : ил.
7. Зайдель, А. Н. Погрешности измерения физических величин / А. Н. Зайдель. – Л. : Наука, 1985. – 112 с.
8. Спиридонов, Н. В. Плазменные и лазерные методы упрочнения деталей машин / Н. В. Спиридонов, О. С. Кобяков, И. Л. Куприянов ; под ред. В. Н. Чачина. – Минск : Высш. шк., 1988. – 155 с.
9. Мрочек, Ж. А. Прогрессивные технологии восстановления и упрочнения деталей машин / Ж. А. Мрочек, Л. М. Кожуро, И. П. Филонов. – Минск : Технопринт, 2000. – 268 с.

Статья сдана в редакцию 17 января 2013 года

Ольга Николаевна Войтович, ассистент кафедры, Белорусский национальный технический университет. E-mail: tmm@bntu.by.

Игорь Олегович Соколов, канд. техн. наук, доц., Белорусский национальный технический университет. E-mail: niil_pilt@bntu.by.

Olga Nilolayevna Voitovich, assistant lecturer, Belarusian National Technical University. E-mail: tmm@bntu.by.

Igor Olegovich Sokorov, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian National Technical University. E-mail: niil_pilt@bntu.by.