

импульсными плазменными потоками [Текст] / А.Ф. Ильющенко, В.А. Оковитый, А.И. Шевцов, В.М. Асташинский, Т.А. Ильющенко // Порошковая металлургия. – Мн.: ОДО "Тонпик", 2003. – Вып. 26. – С. 117-123.

7. Шевцов, А.И. Исследование процессов трения и изнашивания газотермических композиционных покрытий, обработанных импульсами плазменной струи [Текст] / А.И. Шевцов, А.Ф. Ильющенко, В.А. Оковитый, Ю.С. Фень // Порошковая металлургия. – Мн.: ОДО "Тонпик", 2006. – Вып. 29. – С. 243-248.

Материал поступил в редакцию 25.04.08

OKOVITY V.A., SHEVTSOV A.I., ILYUSCHENKO A.Ph., DEVOINO O.G., PANTELEENKO V.V., OKOVITY V.V. TRIBOTECHNICAL TEST SAMPLES OF AMORPHISATED COMPOSITE PLASMA COATINGS WITH INCLUSION OF HARD LUBRICATION

Study tribotechnical test samples of composite plasma coatings, received on regime assist to formation of amorphisated structures. Study wear resistance and antifriction properties of samples in condition friction with boundary lubrication.

УДК 621.793

**Кардаполова М.А., Девойно О.Г., Спиридонов Н.В.,  
Кобяков О.С., Баркун А.А., Королева А.Н.**

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕРМОУПРОЧНЕНИЯ ОПТОВОЛОКОННЫМ ЛАЗЕРОМ ВЫСОКОПРОЧНОГО ЧУГУНА ВЧ-50 С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

**Введение.** Особенности метода лазерного термоупрочнения, определяющими его место среди широкого ряда методов поверхностного упрочнения, являются: 1) возможность концентрации в локальной зоне поверхности высоких плотностей мощности, практически недостижимых другими методами, что позволяет достигать сверхвысоких скоростей нагрева и охлаждения тонкого поверхностного слоя и обеспечивать формирование за счет этого слоев сверхбыстрой закалки с повышенным комплексом свойств за счет высокой степени метастабильности структуры; проводить локальную обработку только рабочих поверхностей деталей без значительного их объемного разогрева; 2) возможность точного управляемого энергетического воздействия на заданную точку поверхности при широком диапазоне его варьирования, что дает предпосылки для стабильного управления структурой и свойствами упрочняемой поверхности в процессе обработки. Для термообработки больших площадей наиболее экономичным считается непрерывный CO<sub>2</sub>-лазер [1]. Появление новейших мощных лазерных источников волоконного типа актуализирует вопрос об эффективности их использования для лазерного термоупрочнения. Известно, что КПД волоконных лазеров с длиной волны 1.07 мкм составляет 25%, что в 2.5..3 раза выше КПД серийных CO<sub>2</sub>-лазеров с длиной волны 10.6 мкм и общая энергетическая эффективность процесса закалки волоконными лазерами оказывается выше в 20-30 раз [2]. При этом с учетом доставки излучения по оптическому волокну и высокому коэффициенту поглощения излучения, позволяющему исключение нанесения поглощающих покрытий – это процесс чистый и полностью контролируемый.

Лазерное термоупрочнение чугунов-процесс эффективный, широко используемый для повышения эксплуатационных характеристик тракторной техники.

Целью работы является исследование процесса лазерного термоупрочнения тормозных колодок трактора «Беларус» из высокопрочного чугуна СЧ-50 и серого СЧ-20 оптоволоконным лазером.

**Методика исследований.** Для исследования были использованы образцы высокопрочного чугуна ВЧ-50 и серого СЧ-20 после лития в формы. Лазерное поверхностное упрочнение проводили на оптоволоконном лазере серии IPG максимальной мощности 2 кВт длиной волны 1.07 мкм и транспортным волокном 50 мкм. Лазер использовался в режиме непрерывного излучения. Фокусировка

производилась вариосистемой с переменным фокусным расстоянием. Поверхность шлифованного металлического образца относительно лазерного пучка размещалась под углом 20 градусов, чтобы отраженное излучение гарантированно не попадало в технологическую головку.

Исследовали влияние параметров лазерной обработки на шероховатость поверхности образцов из высокопрочного ВЧ50 и серого СЧ20 чугунов методом полнофакторного эксперимента.

Так как число варьируемых факторов невелико, оказалось возможным реализовать полную реплику, в которой число опытов равно 2 в степени, равной числу факторов:  $N = 2^k$ , позволяющую в ходе эксперимента варьировать одновременно несколькими параметрами различной физической природы и получать раздельную, независимую оценку коэффициентов, что невозможно, например, при реализации дробной реплики. При этом необходимо, чтобы все независимые переменные изменялись на максимальном и минимальном уровнях. На первом этапе выбирали основные входные параметры (скорость и диаметр луча лазера), сильно влияющие на параметр оптимизации (шероховатость, микротвердость). Затем определяли пределы их изменения и составляли таблицу исходных данных. Серия состояла из четырех основных опытов, полученная модель считалась линейной и учитывала взаимодействие факторов.

$$Y = B_0 + B_1X_1 + B_2X_2 + B_{12}X_1X_2$$

где  $Y_i$  – параметры оптимизации,  $X_i$  – варьируемые факторы,  $B_{ij}$  – коэффициенты регрессии, описывающие направление и степень влияния каждого из факторов на параметр оптимизации.

Технологические факторы выбирались исходя из возможности их изменения при условии точного измерения их величин, а также исходя из их независимости (ортогональности):

$X_1$  – диаметр луча лазера в месте соприкосновения с поверхностью материала, мм.

$X_2$  – скорость перемещения лазерного луча (фактически производилось перемещение образца под лучом), мм/мин.

Математические модели рассчитывали для следующих параметров оптимизации:

$Y_1$  – шероховатость упрочненной поверхности, мм.

Диаметр луча меняли в пределах 4..5 мм, а скорость от 200 до 3000 мм/мин.

**Кардаполова Маргарита Анатольевна**, к.т.н., ведущий научн. сотрудник НИИП плазменных и лазерных технологий НИЧ Белорусского национального технического университета.

**Спиридонов Николай Васильевич**, д.т.н., профессор кафедры технологии машиностроения Белорусского национального технического университета.

**Кобяков Олег Сергеевич**, к.т.н., ведущий научн. сотр. НИИП плазменных и лазерных технологий НИЧ Белорусского национального технического университета.

**Королева Анна Николаевна**, научн. сотр. НИИП плазменных и лазерных технологий НИЧ Белорусского национального технического университета.

Беларусь, БНТУ, 220013, г. Минск, пр. Независимости, 65.

**Баркун Александр Александрович**, зам. ген. директора по производству РУП МТЗ, г. Минск.

Для оценки достоверности и адекватности модели повторные опыты проводили дважды на основном уровне.

Проверяли гипотезу об однородности дисперсий с помощью критерия Кохрена, значимость коэффициентов уравнения с помощью критерия Стьюдента и адекватность уравнения выбранной математической модели - критерия Фишера.

По полученным уравнениям получали расчетные данные переменной в зависимости от параметров лазерной обработки.

Следует отметить, что данное уравнение согласно теории планирования эксперимента можно использовать в  $\sqrt{3}$  большем по размаху диапазоне параметров лазерной обработки, чем тот, в котором производился эксперимент.

По полученным уравнениям строили графики.

Исследовали влияние параметров лазерной обработки на размерные параметры зоны обработки: ширину и глубину расплавленной зоны, зону термического влияния. По данным исследований проводили корреляционный анализ на ПЭВМ с помощью программы «Аррохиматор». Для каждой пары факторов рассчитывали коэффициенты парной корреляции по всем возможным вариантам взаимодействий согласно таблице 1. Строили графики парного взаимодействия с наибольшим коэффициентом корреляции.

Таблица 1. Виды функций корреляции

Номер кода	Уравнение корреляции	Номер кода	Уравнение корреляции
1	$Y = A + BX$	9	$Y = A \cdot X^B$
2	$Y = 1/(A + BX)$	10	$Y = A = B \cdot \ln(X)$
3	$Y = A + B/X$	11	$Y = A = B \cdot \lg(X)$
4	$Y = X/(A + D/X)$	12	$Y = A/(B + X)$
5	$Y = A \cdot B^X$	13	$Y = A \cdot X/(B + X)$
6	$Y = A \cdot e^{(BX)}$	14	$Y = A \cdot e^{(B/X)}$
7	$Y = A \cdot 10^{(BX)}$	15	$Y = A \cdot 10^{(B/X)}$
8	$Y = 1/(A + B \cdot e^{(-X)})$	16	$Y = A = B \cdot X^N$

Программа «Аррохиматор» запрограммирована по следующей методике.

Вычисляют коэффициенты парной корреляции (теснота связи) следующим образом [2, 3]:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}) \cdot (Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}}, \quad (1)$$

где  $X_i, \bar{X}$  - текущее и среднее значение одного параметра (пара-

метра оптимизации, например, шероховатости);

$Y_i, \bar{Y}$  - то же для другого параметра (входной параметр, например, скорость лазерного луча).

Находят средние значения обоих параметров:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_{1u}}{n}; \quad \bar{Y} = \frac{\sum_{i=1}^n Y_{1u}}{n}, \quad (2)$$

где  $n$  - число опытов;  $u$  - номер опыта.

Коэффициенты выбранного уравнения определяют по формуле:

$$A = \frac{\sum (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sum (X_i - \bar{X})^2}, \quad (3)$$

$$B = \bar{Y} - b_1 X. \quad (4)$$

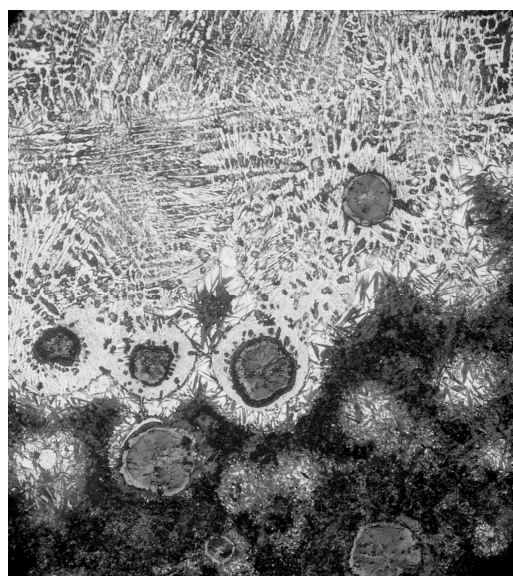
Программа проверяет адекватность полученного уравнения по критерию Фишера.

**Обсуждение результатов.** К особенностям строения поверхностных слоев, формируемых при лазерном термоупрочнении, относится высокая степень метастабильности фаз, заключающаяся в значительной степени пересыщения твердых растворов и увеличении диюметрических и трибологических характеристик [4].

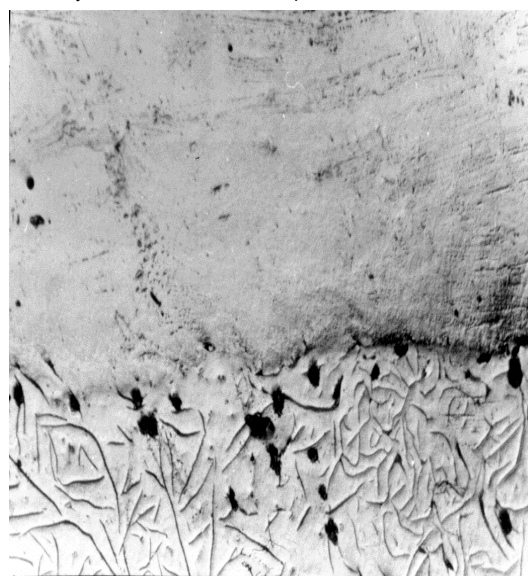
На рисунке 1 представлена микроструктура поперечного сечения чугунов ВЧ-50 и СЧ-20 после закалки оптоволоконным лазером при скорости обработки 1400 мм/мин.

Необходимо отметить, что такая картина сохраняется во всем диапазоне скоростей от 200 до 3000 мм/мин. Зона обработки состоит из нескольких слоев: верхний слой (закалка из жидкого состояния), зона термического влияния (закалка в твердой фазе), основной металл. У серого чугуна (рисунок 1, в) кристаллизация идет по метастабильной диаграмме состояния системы «железо - цементит», и первый слой приобретает структуру доэвтектического белого чугуна [4]. В фазовый состав поверхностного слоя входят дендриты слабо-травящегося метастабильного аустенита, размер которых не зависит от скорости обработки и мощности излучения. Лазерная обработка приводит к уменьшению расстояний между ветвями дендритов в 4 раза, а среднего диаметра осей - более чем в 60 раз, что свидетельствует о высокой скорости охлаждения верхнего слоя -  $5 \cdot 10^4 - 10^5$  град. С/с. Междендритные расстояния заполнены мелкодисперсным ледубуритом, обладающим повышенной износостойкостью [5].

Графитные пластины успевают раствориться полностью и высокая твердость, прочность и износостойкость достигается за счет его отбела в условиях высоких скоростей охлаждения. Содержание углерода в аустените достигает запредельных значений и на поря-



а)



б)

Рис. 1. Микроструктура поперечного сечения высокопрочного ВЧ-50 (а) и серого СЧ-20 (в) чугунов после закалки оптоволоконным лазером,  $\times 200$

док уменьшает скорость коррозии [6].

Микротвердость поверхностного слоя чугуна СЧ-20 составляет 2,0 – 3,2 ГПа до и 8,6 – 9,4 ГПа после лазерной обработки. Отсутствует корреляция от скорости обработки по всем формулам таблицы 1. Совершенно другая картина наблюдается при лазерной обработке высокопрочного чугуна ВЧ-50 (рисунок 2).

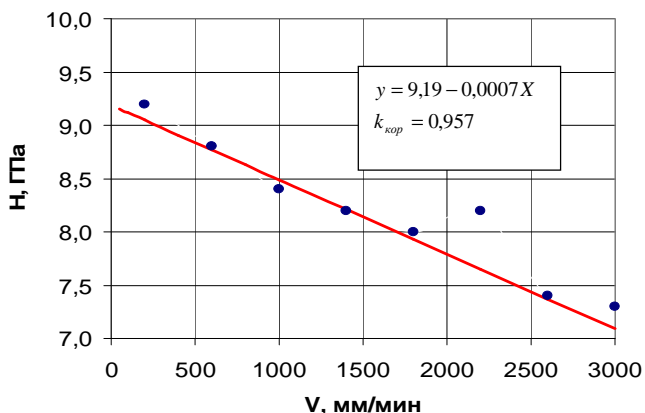


Рис. 2. Влияние скорости движения луча лазера на микротвердость чугуна ВЧ-50 при  $N=2$  кВт и  $d=4$  мм

Микротвердость поверхностного слоя  $H_{\mu 100}$  линейно коррелирует (коэффициент корреляции составляет 0,957) со скоростью обработки, изменяясь от 3,6 – 4,2 в исходном состоянии до 7,8 – 9,5 в зависимости от скорости обработки. Причем, корреляция отрицательная. С увеличением скорости обработки микротвердость падает. Структура поверхностного слоя, в основном, имеет высокопрочную ледебуритную структуру и игольчатую мартенситную (рисунок 1,а) при низких скоростях охлаждения. При увеличении скорости обработки в структуре повышается количество низкоуглеродистого аустенита, который и снижает твердость поверхности.

Глубина упрочненной зоны  $h$ , состоящей из оплавленной зоны и зоны термического влияния (ЗТВ) (рисунок 3), у серого чугуна меньше, чем у высокопрочного. Особенно это заметно при малых скоростях. Но обе кривые зависимости глубины упрочненной зоны от скорости обработки описываются одинаковой математической моделью. В переходном слое высокопрочного чугуна много нерастворившихся графитных включений (рисунок 1,а), т.е. скорость растворения шаровидных включений графита при расплавлении матрицы несколько ниже, чем пластинчатых.

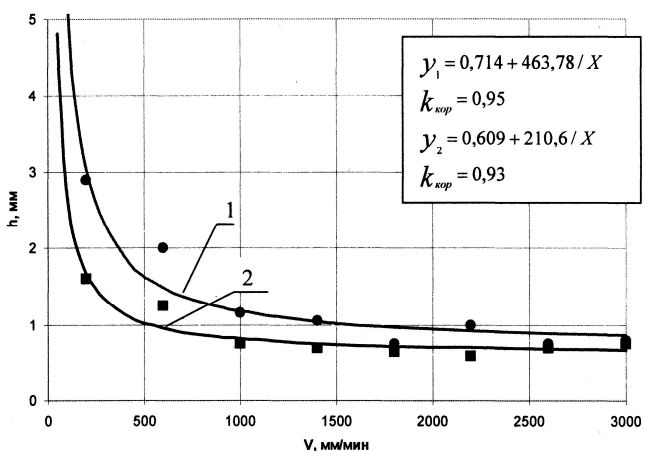


Рис. 3. Влияние скорости обработки лазерного луча на глубину (зона проплава + ЗТВ) зоны проплава высокопрочного ВЧ-50 (1) и серого СЧ-20 (2) чугуна при  $N=2$  кВт и  $d=4$  мм

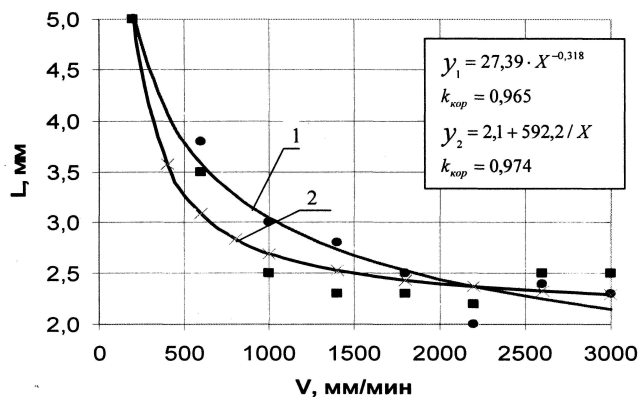


Рис. 4. Влияние скорости обработки лазерного луча на ширину зоны обработки высокопрочного ВЧ-50 (1) и серого СЧ-20 (2) чугуна при  $N=2$  кВт и  $d=4$  мм

На ширину оплавленной зоны  $L$  (рисунок 4) обоих видов чугуна также оказывают значительное влияние параметры лазерной обработки. Например, при ширине луча лазера 4 мм и мощности 2 кВт  $L$  меняется от 2 до 5 мм и хорошо коррелирует со скоростью обработки. Корреляция отрицательная.

У серого чугуна в диапазоне скоростей от 1000 до 3000 мм/мин скорость уже не оказывает значительного влияния и  $L$  составляет от 2 до 2,5 мм. А при небольших скоростях ширина оплавленной зоны у серого чугуна на 10 – 15% меньше, чем у высокопрочного. В результате лазерной закалки металла из жидкой фазы происходят значительные изменения как профиля, так и шероховатости поверхности. Шероховатость поверхности после лазерной обработки особенно важна для разработки технологических процессов. От нее зависит припуск на окончательную механическую обработку. В соответствии с ранее описанной методикой определяли влияние параметров лазерной обработки на шероховатость поверхности. После проверки гипотезы об однородности дисперсий с помощью критерия Кохрена, значимости коэффициентов уравнения с помощью критерия Стьюдента и адекватности уравнения выбранной математической модели - критерия Фишера, получаем уравнение:

$$Y = 1,355 - 0,19X_1 - 0,96X_2 + 0,12X_1X_2, \quad (5)$$

$$Y = 1,366 - 0,154X_1 - 0,996X_2. \quad (6)$$

По расчетным данным строим график зависимости шероховатости от параметров лазерной обработки (рисунок 5).

Из графика видно, что между шероховатостью и параметрами обработки (скоростью и диаметром луча) существует отрицательная корреляция, т.е. с увеличением скорости и диаметра луча шероховатость снижается у чугуна ВЧ50 при  $d=4$ мм в 5,6 раза (у СЧ20 – в 8,8 раза), а при  $d=5$ мм – в 6 раз (у СЧ20 – в 4,5 раза), причем управляющее действие скорости обработки в 5-6 раз выше, чем диаметра луча. При увеличении скорости до 3700 шероховатость находится в пределах 0,045 – 0,085мм у ВЧ50 и 0,071 – 0,008мм у СЧ20.

**Заключение.** Получены экспериментальные данные процессов лазерного термоупрочнения высокопрочного ВЧ50 и серого СЧ20 чугунов с использованием новейших оптоволоконных лазеров. Экспериментальные результаты исследований будут использованы при разработке технологического процесса лазерного термоупрочнения деталей автотракторной техники. Освоение технологии позволит увеличить прочностные, износостойкие и эксплуатационные свойства деталей трактора «Беларус». Широкое внедрение в производство лазерного термоупрочнения оптоволоконными лазерами требует дополнительных исследований.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Скрипченко А.И., Медвецкий В.М., Попов В.А. Тестирование процесса закалки сталей излучением волоконных лазеров. – М.: РИТМ, 2007. – №3. – С. 52-54.

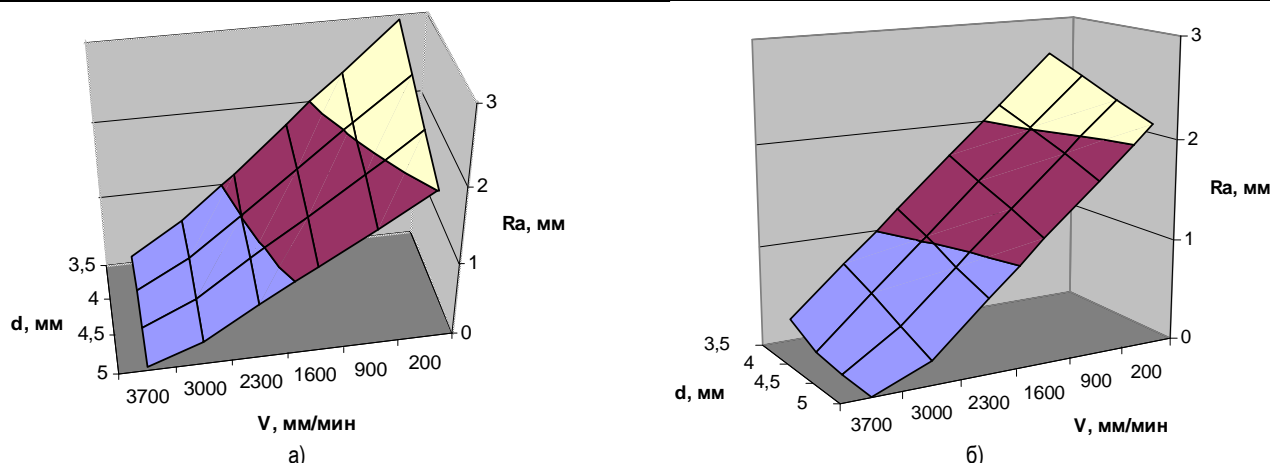


Рис. 5. Влияние параметров лазерной обработки на шероховатость поверхности чугуна ВЧ50 (а) и СЧ20 (б) при мощности 2 кВт

- Новик Ф.С. Математические методы планирования экспериментов в металлведении. Планирование промышленных экспериментов. – М., 1971. – 36 с.
- Вознесенский В.А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях. – М.: Финансы и статистика, 1981. – 264 с.
- Коваленко В.С., Головки Л.Ф., Черненко В.С. Упрочнение и легирование деталей машин лучом лазера – К.: Техника, 1990. – 192 с.
- Дубняков В.Н., Кашук О.Л./ МИТОМ, 1986. – №9. – С. 35-39.
- Влияние лазерной обработки на коррозионные свойства чугуна// В.Ю. Васильев, Н.В. Еднерал, Т.Г. Кузьменко и др./Защита металлов. – 1982. – Т.18. – С. 123-127.

Материал поступил в редакцию 25.04.08

KARDAPOLOVA M.A., DEVOINO O.G. Etc. RESEARCH OF PROCESS OF THERMAL HARDENING OPTICAL FIBER BY THE LASER OF HIGH-STRENGTH PIG-IRON BЧ-50 WITH USE OF METHODS OF MATHEMATICAL MODELING

In clause the experimental data of laser thermal hardening of high-strength and grey pig-iron are given.

The results of researches have allowed to develop technological process of hardening of details of auto tractor engineering. The recommended technology of hardening increases durability and deterioration stability of property of details, that is confirmed by operation of a tractor "Belarus".

УДК 621.97

**Мрочек Ж.А., Шатуров Г.Ф., Жолобов А.А., Шатуров Д.Г.**

## ПЕРСПЕКТИВНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ СОВМЕЩЕННОЙ ОБРАБОТКИ ВАЛОВ РЕЗАНИЕМ И ОБКАТЫВАНИЕМ

**Введение.** Результаты исследований процесса совмещенной обработки цилиндрических поверхностей (валов, штоков) резанием призматическим резцом с одновременным обкатыванием роликом или шариком, установленными оппозитно резцу, показывают, что точность диаметральных размеров в продольном сечении валов, по сравнению с раздельной обработкой, повышается до 40 %, а погрешность формы значительно (до 4 раз) уменьшается [1,2]. Недостатком известных комбинированных инструментов является несбалансированность стойкости режущего элемента – резца и упрочняющего элемента – ролика или шарика комбинированного инструмента, поскольку стойкость деформирующих элементов в несколько раз выше стойкости режущих. Это обстоятельство не позволяет получать поверхность с однородной шероховатостью на всей длине вала, вследствие непрерывного износа лезвия резца, особенно в формообразующей поверхности точке лезвия – вершине резца. В результате происходит увеличение диаметра обкатываемой поверхности, натяга деформирующего элемента и усилия деформирования.

Использование в качестве режущего элемента самовращающихся (ротационных) резцов в какой-то степени решает эту проблему, так как их стойкость, вследствие увеличения длины режущей кромки (РК) в 3-4 раза, выше стойкости призматических резцов. Од-

нако перемещение РК со скоростью, соизмеримой со скоростью вращения заготовки, приводит к быстрому механическому и термическому износу лезвия, образованию волнистости на обрабатываемой поверхности, вследствие биения РК, и к ухудшению качества поверхности.

**Анализ способов обработки резания.** Альтернативой известным способам обработки резанием может служить процесс резания чашечным резцом с микрообновлением режущей кромки (МОРК) (рис. 1) [3].

Во всех известных процессах обработки поверхностей резанием каждый последующий участок обрабатываемой поверхности формообразуется лезвием инструмента, имеющим определенный износ, полученный при обработке предыдущего участка поверхности. Это заранее предопределяет ухудшение качества обработки последующего участка по сравнению с предыдущим. Особенно это сказывается при обработке валов большой протяженности, когда разница в качестве обрабатываемой поверхности в начале и в конце обработки одной заготовки детали достигает максимального значения.

Обработка резанием чашечным резцом с микрообновлением РК, принудительная скорость перемещения которой на 5-6 порядков

**Мрочек Жорж Адамович**, д.т.н., профессор кафедры технологии машиностроения Белорусского национального технического университета. Беларусь, БНТУ, 220013, г. Минск, пр. Независимости, 65.

**Шатуров Геннадий Филиппович**, д.т.н., профессор кафедры экономики Гродненского филиала ЧУО "БИП - Институт правоведения". Беларусь, БИП-ИП, 230005, г. Гродно, ул. Дзержинского 41/2.

**Жолобов Александр Алексеевич**, к.т.н., профессор первый проректор Могилевского Российско-Белорусского университета.

**Шатуров Дмитрий Геннадьевич**, аспирант Российско-Белорусского университета.

Беларусь, ГУВПО БРУ, 212005, г. Могилев, пр. Мира, 43.