

вание локальной особенности напряженного состояния, но и повышение прочности. Раскрываются также дополнительные возможности исследования локального исчерпания ресурса пластичности, возникновение начальных элементов разрушения, приводящих к развитию деструкции материала, вплоть до разрушения.

### ВЫВОД

Представление сопротивления сдвигу в системе самоорганизации деформационного движения не может быть завершено без теоретического вскрытия и этих сопутствующих закономерностей механики, оказывающих существенное влияние на сопротивление деформированию и долговечность изделий. Изучение влияния факторов разрушения как элементов общего сопротивления деформированию позволит представить теории прочности, пластичности, разрушения и других смежных с ними дисциплин на более высоком уровне по сравнению с нынешним. Именно введение в теорию понятия структуры напряженно-деформированного состояния как фактора, уточняющего сопротивление деформационному движению в форме симметричного и асимметричного ее представления, позволяет существенно повысить разрешающую способность теории деформационного движения.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Хакен, Г.** Синергетика / Г. Хакен. – М.: Мир, 1980. – 406 с.
2. **Макушок, Е. М.** Самоорганизация деформационных процессов / Е. М. Макушок. – Минск: Наука і тэхніка, 1991. – 264 с.
3. **Макушок, Е. М.** Парадигма механики, учитывающая самоорганизацию неоднородных деформационных процессов / Е. М. Макушок // Весці Акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 1994. – № 2. – С. 44–47.
4. **Философский** энциклопедический словарь / ред.-сост. Е. Ф. Губский [и др.]. – М.: Инфра-М., 2003. – 576 с.
5. **Сахаров, А. Д.** Воспоминания / А. Д. Сахаров // Наука и жизнь. – 1991. – № 4. – С. 10–19.
6. **Физическая** энциклопедия / гл. ред. А. М. Прохоров, редкол. Д. М. Алексеев [и др.]. – М.: Большая Российская энциклопедия. – 1998. – Т. 1. – 704 с.
7. **Губкин, С. И.** Теория обработки металлов давлением / С. И. Губкин. – М.: Metallurgizdat, 1947. – 532 с.
8. **Кузнецов, В. Д.** Наросты при резании и трении / В. Д. Кузнецов. – М.: Машгиз, 1956. – 184 с.
9. **Петюшик, Е. Е.** Особенности деформирования проволоки при радиальном обжатии тел намотки / Е. Е. Петюшик // Проблемы инженерно-педагогического образования в Республике Беларусь: материалы междунар. науч.-практ. конф. / под общ. ред. Б. М. Хрусталева. – Минск: УП «Технопринт», 2004. – С. 281–286.
10. **Макушок, Е. М.** О возникновении деформационной аномалии при радиальном обжатии намотанных проволочных конструкций / Е. М. Макушок, Е. Е. Петюшик, О. П. Реут // Машиностроение. – 2007. – Вып. 23. – С. 367–370.
11. **Макушок, Е. М.** О методологии анализа деформационных аномалий при радиальном обжатии проволочных конструкций / Е. М. Макушок, Е. Е. Петюшик, О. П. Реут // Порошковая металлургия. – 2007. – Вып. 30. – С. 280–286.

Поступила 22.02.2008

УДК 621.785.048.7

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЛАЗЕРНОГО ТЕРМОУПРОЧНЕНИЯ ВНУТРЕННИХ КОНТАКТНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТОРМОЗНЫХ МЕХАНИЗМОВ ТРАКТОРА «БЕЛАРУС»

*Канд. техн. наук КОБЯКОВ О. С., докт. техн. наук, проф. СПИРИДОНОВ Н. В.,  
канд. техн. наук КАРДАПОЛОВА М. А., БАРКУН А. А.*

*Белорусский национальный технический университет,  
Минский тракторный завод*

Тормозная многодисковая система трактора модели 1221М, работающая в смазочной масляной среде, отличается повышенной надежностью, долговечностью и отвечает ряду современных требований и международным стандартам качества.

Однако с точки зрения равноресурсности, ряд деталей тормозных механизмов нуждаются в повышении их ресурса по прочностным и износостойким свойствам. К числу таких деталей относятся корпусные детали тормоза, изготовленные из высокопрочного чугуна марки ВЧ-50.

В процессе эксплуатации тормозных механизмов установлено, что повышенному изнашиванию подвержены упоры промежуточных дисков корпуса, расположенные на его внутренней поверхности.

Практика показывает, что использование традиционных методов термоупрочнения (объемная закалка, закалка ТВЧ и т. д.) не обеспечивает должного эффекта по прочностным и износостойким свойствам и создает дополнительные проблемы при последующей механической обработке упрочненных деталей. С учетом этих обстоятельств наиболее актуальным является использование технологии лазерного термоупрочнения. Лазерное термоупрочнение изделий из чугуна представляет большой практический интерес в связи с широким использованием данного металла в сельскохозяйственном машиностроении [1].

Исследованы процессы лазерного термоупрочнения чугуна ВЧ-50 с проплавлением поверхностного слоя металла. Использовался СО<sub>2</sub>-лазер непрерывного излучения «Комета-2» выходной мощностью 1,5 кВт с длиной волны излучения 10,2 мкм, а также «Гарпун-2М» с выходной мощностью 2,5 кВт.

Часть образцов получена лазерным термоупрочнением с использованием новейших волоконных диодных лазеров ВЛ-2000 и ВЛ-3000 с длиной волны излучения 1,07 мкм и мощностью 2000 и 3000 Вт соответственно. С целью сравнительного анализа по прочностным и структурным свойствам с высокопрочным чугуном ВЧ-50 часть образцов была изготовлена из серого чугуна СЧ-20. Основной целью исследований было проведение предварительного анализа возможной замены более дорогого и труднообрабатываемого чугуна ВЧ-50 на дешевый и легче поддающийся механической обработке серый чугун СЧ-20.

Исследованы прочностные свойства упрочненного металла, формирование микроструктуры, размерные параметры и геометрия зон лазерной закалки, а также шероховатость поверхности. Использовались стандартная аппаратура и методика измерения. Микротвердость металла измерялась микротвердомером ПМТ-3 при нагрузке 100 г и времени экспозиции 10 с, а также на приборе Micromet при нагрузке 200 г и времени экспозиции 5 с. Размерные парамет-

ры зон упрочнения анализировались с помощью микроскопа МБС-9 с метрической шкалой с ценой деления 0,01 мм.

Микроструктура зон лазерного термоупрочнения анализировалась оптической микроскопией с помощью микроскопов Neophot, «Эпигност», MICRO-200 при увеличении от 150 до 1000 раз. Шероховатость поверхности образцов измерялась с помощью профилографа-профилометра мод. 252А.

Лазерное термоупрочнение деталей из чугунов за последние 10–15 лет получило заметное промышленное применение в различных отраслях промышленного производства [2].

Сложность наблюдаемых процессов лазерного термоупрочнения, их количественная оценка определяются, прежде всего, теплофизическими свойствами металла, его фазовыми и структурными характеристиками, энергетическими параметрами лазерного излучения, а также технологическими факторами термообработки [3]. Например, влияние такого параметра, как скорость движения лазерного пятна нагрева при постоянных значениях мощности или плотности мощности лазерного луча, является одним из наиболее существенных факторов, влияющих на последующее формирование микроструктуры и прочностные (микротвердость) характеристики упрочненного металла. Другим фактором является наличие сферических графитовых включений в металле, во многом определяющих формирование структуры и свойств закаленного металла.

Было установлено, что применительно к чугунам с шаровидными включениями графита основными структурными составляющими являются мартенсит и аустенит. Присутствие аустенитной фазы обеспечивает высокую твердость (до 62–65 HRC) и эксплуатационную стойкость термоупрочненного металла вследствие превращения метастабильного аустенита в мартенсит [4].

Для исследований параметров металла чугунов ВЧ-50 и СЧ-20 термоупрочнение осуществлялось в основном с использованием волоконного диодного лазера ВЛ-2000 выходной мощностью 2 кВт при среднем диаметре пятна нагрева 4–5 мм.

На основании полученных данных построены графики зависимости средних значений

микротвердости чугуна ВЧ-50 от скорости движения зоны нагрева. На графике (рис. 1) показано изменение значений микротвердости ( $H_{\mu 100}$ ) в диапазоне скоростей зоны нагрева от 200 до 1400 мм/мин и глубины зоны термоупрочнения ( $h$ , мм) закалки, начиная от 1,5 мм.

Как видно из графика, значительный рост микротвердости наблюдается в приповерхностных участках зоны оплавления (до 9000–10000 МПа), а в средних областях зоны твердость металла уменьшается до значений 8500–9000 МПа. В целом изменение микротвердости от скорости для данного диапазона не столь заметно по сравнению со скоростями в диапазоне 1800–3000 мм/мин.

Как видно из графика (рис. 2), в данном случае наблюдается заметное уменьшение мик-

ротвердости до 4000–4200 МПа при замерах на глубине зоны закалки, начиная от 1,5 мм.

Следует отметить, что полученные значения микротвердости на диодных лазерах несколько выше по максимальному значению твердости металла, полученному нами ранее при использовании CO<sub>2</sub>-лазеров с длиной волны излучения 10,2 мкм.

Использование излучения диодных волоконных лазеров с длиной волны 1,07 мкм не требует нанесения поглощающих покрытий. Поглощение обусловлено в основном состоянием упрочняемой поверхности, зависящей от вида предварительной механической обработки металла и сформировавшегося рельефа поверхности.

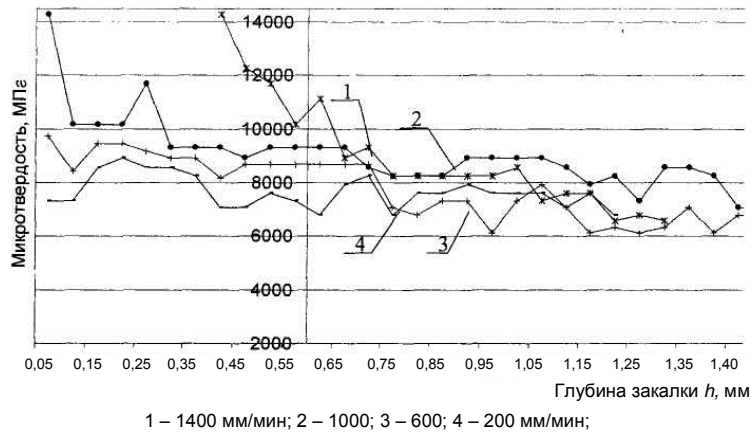


Рис. 1. Зависимость микротвердости  $H_{\mu 100}$  и глубины зоны лазерной закалки  $h$ , мм, высокопрочного чугуна ВЧ-50 от скорости  $v$ , мм/мин, пятна нагрева в диапазоне скоростей от 1400 до 200 мм/мин

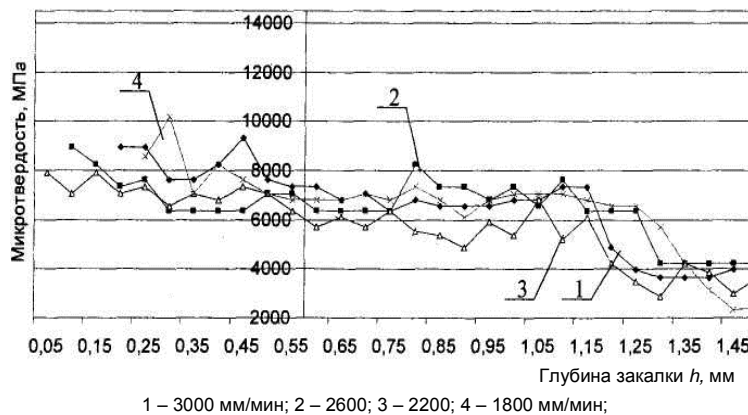


Рис. 2. Зависимость микротвердости  $H_{\mu 100}$  и глубины зоны лазерной закалки  $h$ , мм, высокопрочного чугуна ВЧ-50 от скорости  $v$ , мм/мин, пятна нагрева в диапазоне скоростей от 3000 до 1800 мм/мин

Например, существенное влияние исходной шероховатости обработанной поверхности на глубину зон термоупрочнения отмечалось в процессе лазерного легирования металлов [5]. Замерами шероховатости образцов из чугуна ВЧ-50, обработанных методом чистового фрезерования, нами были получены значения  $R_a = 5,35$  мкм. В результате лазерной закалки металла из жидкой фазы происходят значительные изменения как профиля, так и шероховатости поверхности. Так, при замерах параметров поверхности вдоль упрочненных дорожек величина  $R_a$  уменьшалась до  $R_a = 3,2$  мкм при средних значениях  $H_{max} = 11,5$  мкм и  $H_{min} = 6,2$  мкм. Измерения рельефа и шероховатости оплавленной поверхности в зависимости от режимов лазерной термообработки показали значительные изменения профиля и шероховатости (табл. 1, рис. 3) поверхности от изменения режимов закалки и прежде всего скорости движения зоны нагрева.

Таблица 1

Размерные параметры зоны оплавления и зоны термического влияния в зависимости от скорости обработки чугуна ВЧ-50 при  $N = 2$  кВт и  $d = 4$  мм

Размерный параметр	Скорость движения детали относительно луча лазера, мм/мин							
	200	600	1000	1400	1800	2200	2600	3000
$L$ , мм	5,0	3,8	3,0	2,8	2,5	2,0	2,4	2,3
$H_1$ , мм	2,3	1,5	0,95	0,6	0,35	0,4	0,4	0,4
$H_2$ , мм	0,6	0,5	0,2	0,45	0,4	0,6	0,35	0,4

Термоупрочнение чугуна СЧ-20 осуществлялось с проплавлением поверхности с помо-

щью диодного волоконного лазера ВЛ-2000. Диаметр пятна нагрева составлял 3,5–5,0 мм при выходной мощности лазера 2 кВт.

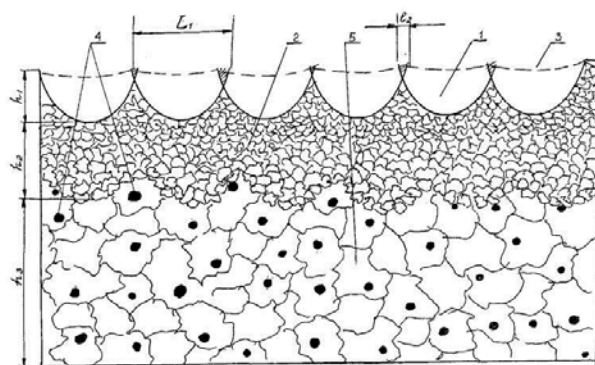


Рис. 3. Структурная схема зон лазерного упрочнения и размерных параметров зон упрочнения:  $L_1$  – верх зоны оплавления;  $L_2$  – область перекрытия зон;  $h_1$  – глубина оплавления;  $h_2$  – зона термического влияния;  $h_3$  – исходный металл

Исследования осуществлялись при различной скорости движения пятна нагрева в интервале скоростей от 200 до 3000 мм/мин.

Целью исследований был выбор режимов и параметров закаленного слоя, близких к оптимальным по прочностным и эксплуатационным свойствам. На основании полученных данных построены графики зависимости величины микротвердости  $H_{\mu 100}$  от глубины упрочненного слоя  $h_3$  при различных скоростях зоны нагрева  $v_3$ .

На графике (рис. 4) представлены кривые для скоростей зоны нагрева в диапазоне от 200 до 1400 мм/мин.

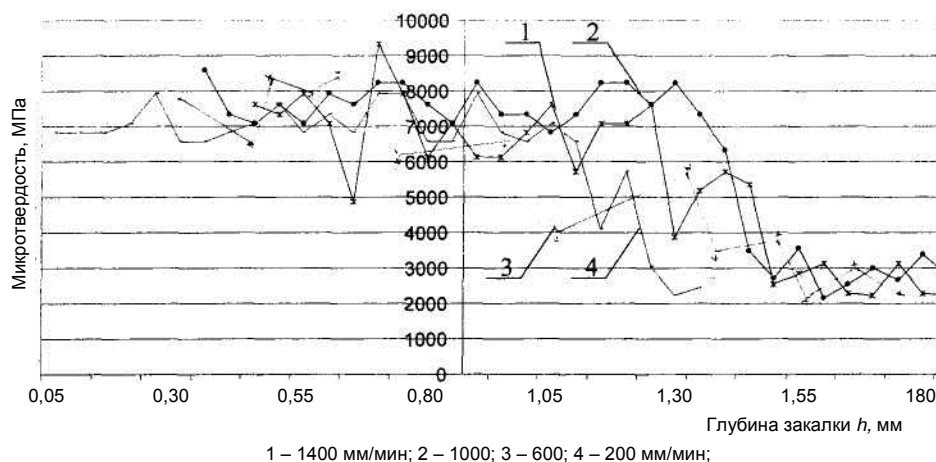


Рис. 4. Зависимость микротвердости  $H_{\mu 100}$  и глубины зоны лазерной закалки  $h$ , мм, серого чугуна СЧ-20 от скорости  $v$ , мм/мин, пятна нагрева в диапазоне скоростей от 1400 до 200 мм/мин: 1 – 1400 мм/мин; 2 – 1000; 3 – 600; 4 – 200 мм/мин

Как видно из графика, общей характерной закономерностью является уменьшение значений микротвердости с увеличением глубины закаленного слоя. Это связано с переходом от режима полного проплавления к режиму закалки из твердой фазы. Для использования в промышленных целях лазерному термоупрочнению наиболее часто подвергаются чугуны с перлитной или перлитно-ферритной металлической основой, включая марки чугунов от СЧ-15 до СЧ-32, а также СЧ-20 [5]. При закалке из твердой фазы упрочнение достигается за счет мартенситных превращений в матричном металле. Однако значение микротвердости упрочненного слоя в этом случае невысокое и не превышает 4200–4500 МПа. В связи с этим нами использован метод упрочнения из жидкой фазы с проплавлением поверхности металла. Наибольшая микротвердость получена на глубине закаленного слоя 0,8–1,2 мм.

С целью более однозначного определения влияния скорости закалки на глубину закаленного слоя и значения микротвердости был построен график (рис. 5) для наиболее оптимальных скоростей зоны нагрева.

Как видно из графика, максимальное значение микротвердости получено при движении зоны в интервале скоростей от 1000 до 1400 мм/мин. При этом средняя величина микротвердости находилась в диапазоне значений от 7000 до 8000 МПа при глубине закаленного слоя в пределах 1,0–1,2 мм. Нами было установлено, что минимальное значение микро-

твердости, при котором обеспечиваются необходимые прочностные и эксплуатационные свойства металла, составляет в среднем величину порядка 7660 МПа. Полученные экспериментальные значения микротвердости для серого чугуна СЧ-20 по порядку величины твердости не выходят за пределы данных значений, что свидетельствует о возможности получения необходимой минимальной твердости для серого чугуна СЧ-20.

Лазерное термоупрочнение чугунов связано прежде всего с получением структур, соответствующих «отбеленному» чугуну [6]. Формирование подобных структур возможно в условиях проплавления поверхности металла при достаточно высоких (не менее  $10^2$  °C/c) скоростях нагрева и охлаждения (до  $10^3$  °C/c), способствующих фазовым и структурным превращениям в металле [7].

В процессе закалки с оплавлением формируются две зоны. Одна из зон, полученная из расплава, при кристаллизации металла состоит из мелких дендритов аустенита. Междендритное пространство заполнено мелкодисперсной ледебуритной составляющей, обладающей, как и мартенсит, повышенными твердостью и износостойкостью. Второй слой зоны лазерного термоупрочнения имеет микроструктуру, состоящую из мелкоигольчатого мартенсита, остаточного аустенита и графита. Граница раздела между зоной полного проплавления и второй зоной, сформировавшейся из твердой фазы, достаточно неровная, не имеющая четких границ.

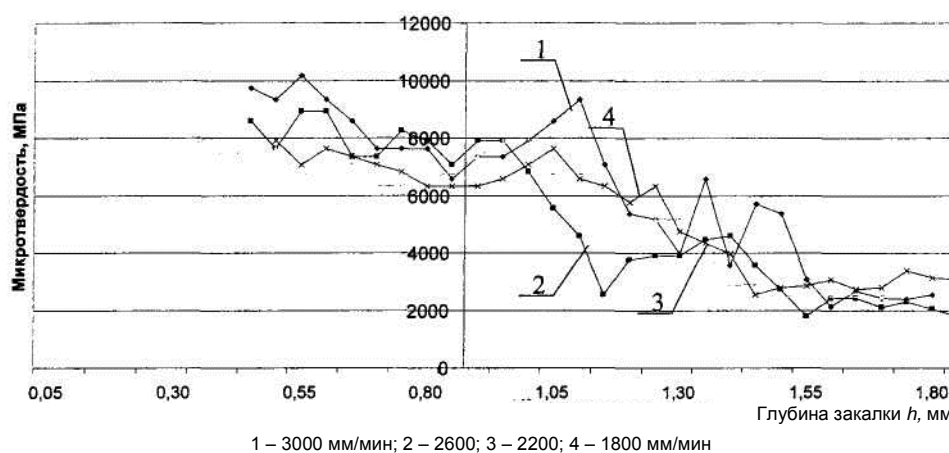


Рис. 5. Зависимость микротвердости  $H_{\mu 100}$  и глубины зоны лазерной закалки  $h$ , мм, серого чугуна СЧ-20 от скорости  $v$ , мм/мин, пятна нагрева в диапазоне скоростей от 3000 до 1800 мм/мин

При более детальном анализе верхней упрочненной зоны с использованием методов оптической микроскопии при увеличении до 1000 раз нами было установлено, что микроструктура металла формируется из очень мелких (порядка нескольких мкм) дендритов или ячеек аустенита с включениями игольчатого мартенсита. В междендритных промежутках располагается двухфазная составляющая, состоящая из ледебуритно-цементитной фазы. Наличие этой фазы и мартенситной структуры обеспечивает высокую твердость и износостойкость металла. Характерная микроструктура упрочненного чугуна ВЧ-50 показана на рис. 6а, б, в.



Рис. 6. Характерная микроструктура зон лазерного воздействия на металл на различных участках зоны оплавления,  $\times 900$ : а – микроструктура приповерхностных участков зоны оплавления, состоящая из игольчатого мартенсита; б – промежуточная зона – аустенитные дендриты с мартенситной игольчатой структурой; в – зона термического влияния, состоящая из троостито-сорбитной структуры

Особенностью микроструктуры высокопрочного чугуна ВЧ-50 является наличие сферического графита в матричной металлической основе, который во многом определяет структурные и прочностные свойства металла в результате лазерного термоупрочнения [8]. В связи с этим микротвердость, например, аустенитных и аустенитно-мартенситных структур составляет 6400–6770 МПа, а цементитная и ледебуритная фазы – 10000–12000 МПа. Наибольший практический интерес представляет

получение закаленного металла на режимах, близких к оптимальным. Так, на режимах, близких к оптимальным, нами [6] были получены значения микротвердости для зоны оплавления в пределах 9500–10000 МПа. Микротвердость металла в области термического влияния, полученная закалкой из твердой фазы, составляла 5700–5800 МПа, а твердость исходного металла – 2300–2400 МПа.

Микроструктура серого чугуна СЧ-20 более однородна и формируется из зоны полностью «отбеленного» металла и зоны закалки из твердой фазы. Наличие «белого чугуна» обусловлено тем, что кристаллизация расплава идет по метастабильной диаграмме «железо – углерод» без выделения свободного графита [9]. На основании настоящих и проводимых нами ранее исследований был разработан технологический процесс лазерного термоупрочнения упоров промежуточных дисков корпусных деталей тормоза 1221М.

На рис. 7 показана принципиальная схема лазерного термоупрочнения внутренних контактных поверхностей упоров промежуточных дисков остановочного тормоза. Упрочнение осуществляется перемещением лазерной фокусирующей головки (Л.Г.) роботом-манипулятором в автоматическом режиме, который управляется компьютером лазерного технологического комплекса.

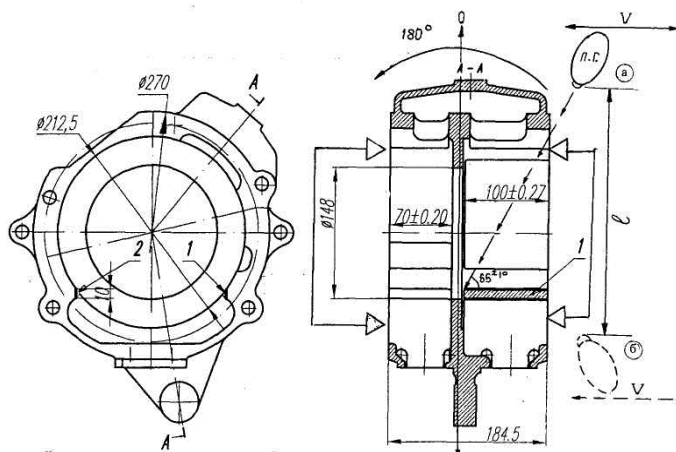


Рис. 7. Принципиальная схема термоупрочнения упоров промежуточных дисков корпусных деталей тормоза 1221М: 1 – упрочняемая поверхность остановочного тормоза; Л.Г. – лазерная фокусирующая головка в исходном положении (а);  $v$  – скорость перемещения головки;  $l$  – перемещение головки в новое положение

Процесс термоупрочнения будет осуществляться с использованием длиннофокусной лазерной оптики ( $f_{\phi} \approx 500$  мм) под углом к упрочняемой поверхности, что позволит исключить наличие отражающих зеркал, расположенных внутри детали.

После окончательной корректировки режимов по результатам стендовых испытаний деталей технологический процесс будет рекомендован для внедрения в производство на РУП ПО «МТЗ».

### ВЫВОД

Получены экспериментальные данные процессов лазерного термоупрочнения высокопрочного ВЧ-50 и серого СЧ-20 чугунов с использованием газовых и новейших диодных волоконных лазеров. Экспериментальные результаты исследований будут использованы при разработке технологического процесса лазерного термоупрочнения контактных поверхностей упоров корпусных деталей тормоза. Освоение технологии позволит увеличить прочностные, износостойкие и эксплуатационные свойства тормозных механизмов трактора «Беларус».

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Спиридонов, Н. В.** Плазменные и лазерные методы упрочнения деталей машин / Н. В. Спиридонов, О. С. Кобяков, И. Л. Куприянов. – Минск: Вышэйш. шк., 1988. – 155 с.
2. **Лазерное** упрочнение коленчатых валов из высокопрочного чугуна / А. А. Левченко [и др.] // Физика и химия обработки материалов. – 1987. – № 1. – С. 62.
3. **Архипов, В. Е.** Лазерная обработка ферритного чугуна / В. Е. Архипов, А. Я. Гречин, М. Л. Хива // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1980. – № 4. – С. 16.
4. **Коваленко, В. С.** Упрочнение и легирование деталей машин лучом лазера / В. С. Коваленко, А. Ф. Головкин, В. С. Черненко. – Киев: Техника, 1990. – 192 с.
5. **Аронин, А. С.** Структура высокоуглеродистых сплавов железа после лазерной закалки из жидкого состояния и отпуска / А. С. Аронин, В. С. Крапошин // Металлофизика. – 1990. – Т. 12, № 4. – 101 с.
6. **Оптимизация** режимов лазерного термоупрочнения железоуглеродистых сплавов на примере закалки высокопрочного чугуна ВЧ-50 / Н. В. Спиридонов [и др.] // Теория и практика машиностроения. – Минск: УП «Технопринт». – 2004. – № 2. – С. 59–63.
7. **Райнке, Ф. Х.** Структура и свойства чугуна после отбеливания поверхностным переплавом / Ф. Х. Райнке // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1989. – № 5.

Поступила 4.04.2008

УДК 620.4539.37

## ТЕХНОЛОГИЯ СКОРОСТНОГО ГОРЯЧЕГО ВЫДАВЛИВАНИЯ СТЕРЖНЕВЫХ ИЗДЕЛИЙ С ПЛАКИРОВАНИЕМ ТОРЦОВОЙ ЧАСТИ

*Докт. техн. наук, доц. КАЧАНОВ И. В., асп. ШАРИЙ В. Н.*

*Белорусский национальный технический университет*

Характерной особенностью современного промышленного производства Республики Беларусь являются отсутствие собственной сырьевой базы и существенная зависимость от импортных энергоносителей и материальных ресурсов, поставляемых по мировым ценам. При работе в таких условиях эффективность производства в основном может быть достигнута за счет всемерной экономии и внедрения высокопроизводительных, энерго- и ресурсосберегаю-

щих технологий, обеспечивающих получение высококачественной, конкурентоспособной продукции. В этой связи большими потенциальными возможностями обладают технологические процессы, основанные на использовании высоких скоростей деформирования. К их числу относится и скоростное горячее выдавливание с плакированием торцовой части (СГВ с ПТЧ), позволяющее за один удар получать заготовки стержневых изделий широкого про-