

УДК 621.78; 621.179.2

А. Л. Лисовский, канд. техн. наук, доц., И. В. Плетенев

## ЛАЗЕРНОЕ УПРОЧНЕНИЕ ШТАМПОВОГО ИНСТРУМЕНТА

Приведены сведения о возможности применения лазерной закалки для уменьшения механического изнашивания рабочих поверхностей штампового инструмента – типа гибочных матриц и пуансонов. Проведен анализ путей обеспечения работоспособности рабочего инструмента штамповой оснастки, материалов и влияние легирующих элементов на их свойства. Приведены характеристики лазерного луча и установок, способных проводить лазерное упрочнение и влияние режимов обработки на свойства упрочненной поверхности.

### *Введение*

Стоимость инструментальной оснастки составляет 8...20 % от себестоимости поковок и связана с конфигурацией заготовки, серийностью выпуска, маркой исходного материала и др. Выход из строя инструментальной оснастки в результате поломки составляет ~30 %, износа – ~18 %, неудачного подбора стали для штампов – ~11 %, от несоблюдения режима термообработки – ~6 % [1].

Повысить срок службы деталей штамповой оснастки позволяют различные методы упрочнения изнашиваемых поверхностей. Упрочнение деталей машин обеспечивает экономию высококачественного металла, топлива, энергетических и трудовых ресурсов, а также рациональное использование природных ресурсов и охрану окружающей среды [2].

Известны случаи, когда ресурс деталей, упрочненных прогрессивными способами, в несколько раз выше ресурса новых деталей, обработанных по старой технологии, что позволяет добиться значительных экономических эффектов.

Упрочнение деталей штамповой оснастки методом лазерной закалки является актуальной задачей для РПУП «Завод «Измеритель». На предприятии уже имеются две лазерные установки «Квант-15», а данная технология ранее не применялась.

При этом возникает необходимость исследования структуры и свойств поверхностного слоя. Большое значение в успешном освоении разработанной технологии имеют организационные компонен-

ты – создание условий, стимулирующих освоение новой упрочняющей технологии на конкретном предприятии.

### *Анализ путей обеспечения работоспособности рабочего инструмента штамповой оснастки*

Стойкость штампового инструмента в большей мере определяется структурой и свойствами поверхностных слоев инструмента, которые претерпевают наиболее ощутимые изменения в процессе эксплуатации. В поверхностном слое штампового инструмента развиваются процессы термической и механической усталости, пластическая деформация, а также окисление и истирание рабочей поверхности. Интенсивность протекания этих процессов, характер их взаимодействия зависят от условий работы инструмента и свойств его материала. Поэтому от выбора материала и способа упрочнения рабочего инструмента штамповой оснастки во многом будет зависеть длительность работы штампа.

### *Материалы, применяемые при изготовлении штамповой оснастки, и область их применения*

Рабочие детали штампов (пуансоны и матрицы) подвергаются ударной нагрузке с сильной концентрацией напряжений на рабочих кромках или на рабочей поверхности. Поэтому к материалу пуансонов и матриц предъявляется требование высокой или повышенной

твердости и износоустойчивости при наличии достаточной вязкости.

Стали, применяемые для изготовления рабочих частей штампов холодной листовой штамповки, делятся на следующие группы.

1. Углеродистые инструментальные стали небольшой прокаливаемости (диаметр  $d$  до 25 мм): У18А, У10А, У8, У10.

2. Легированные стали повышенной прокаливаемости ( $d$  до 40–50 мм): Х (ШХ15), Х09 (ШХ9), 9Х, 9ХС, 9ХФ, ХВГ, 9ХВГ, ХГСВФ.

3. Высокохромистые стали высокой прокаливаемости ( $d$  до 80 мм), высокой износоустойчивости, мало деформируемые при закалке: Х12Ф1, Х12Ф, Х12М, Х12Х6ВФ, ХГЗСВФ.

4. Легированные стали повышенной вязкости (при твердости HRC 56–58): 4ХС, 6ХС, 4ХВ2С, 5ХВ2С, 6ХВ2С, 5ХВГ.

Углеродистые инструментальные стали после правильно выполненной термической обработки обладают такой же твердостью и прочностью, как и многие легированные стали.

Применение углеродистых инструментальных сталей ограничивается рабочими частями штампов простой формы толщиной или диаметром до 25 мм. Наиболее пригодны для изготовления штампов стали марок У10А и У10, имеющие более высокую прочность на изгиб, чем другие марки углеродистой инструментальной стали ( $\sigma_{из} = 200...230$  МПа при HRC 59–60).

Легированные инструментальные стали повышенной прокаливаемости позволяют изготовить рабочие части штампов толщиной до 40 мм (при закалке в воду). Прочность на изгиб этих сталей после закалки и отпуска на твердость HRC 59–61 несколько выше, чем у углеродистых сталей, и достигает  $\sigma_{из} = 250$  МПа.

Высокохромистые стали обладают высокой прокаливаемостью и закаливаемостью, что позволяет использовать их для штампов больших сечений и применить закалку с умеренным охлаждением, что уменьшает деформацию изделия.

Высокохромистые износоустойчивые стали имеют некоторые различия по механическим свойствам после закалки. Сталь Х12Ф1 несколько пластичнее сталей Х12Ф и Х12М. Но сталь Х12М имеет несколько более высокую твердость (на одну единицу по Роквеллу) и большую износоустойчивость [6].

### **Термическое упрочнение стали лазерами высокой мощности**

От обычных тепловых источников лазерный луч отличается высокой плотностью потока энергии порядка  $10^5...10^6$  Вт/см<sup>2</sup>. Конструкции лазерных установок позволили достичь плотности мощности лазерного излучения, мощности индукционных нагревателей, дуговой плазмы и электронных лучей. Это ускорило развитие старых и разработку новых методов лазерной обработки материалов. Лазерная резка и сверление применяются обычно для обработки пластмасс, керамики, дерева, текстиля и металлов, в то время как сварка и поверхностная термообработка используются, в основном, применительно к металлам и сплавам.

Лазерное излучение, поток фотонов высокой интенсивности передаются почти без потерь, благодаря низкой расходимости излучения, к поверхности металлов и, поглощаясь, превращаются в тепловую энергию, которая выделяется в тонком слое.

Можно проводить модификацию поверхности: переплав, легирование, нанесение покрытий, полировку. Отжиг и закалка проводятся при сохранении металлами твердого состояния [4].

Для сварки, резки, сверления, плавления, скрайбирования, закалки, гравировки и повышения качества поверхности используется то обстоятельство, что монохроматическое лазерное излучение оптически может быть сфокусировано в пятно очень маленьким диаметром, при этом достигается очень высокая плотность энергии и мощность. Для обработки материалов необходимо

определенное взаимодействие с веществом. Решающей величиной при обработке является доля поглощения лазерного излучения, которое зависит от длины волны излучения, температуры и свойств материала. В зависимости от температуры, достигаемой на поверхности, могут использоваться следующие технологии:

– тепловая обработка, тепловой удар

$$T_0 < T_s;$$

– сварка, переплавка, поверхностное легирование

$$T_s \leq T_0 \leq T_v;$$

– резка, сверление, фрезерование, скрайбирование, подгонка, динамическое уравнивание, удаление материала

$$T_0 > T_s,$$

где  $T_0$  – температура на поверхности ма-

териала;  $T_s$  – температура плавления;  $T_v$  – температура испарения [7].

### **Принцип лазерного термоупрочнения**

Принцип лазерного термоупрочнения заключается в воздействии лазерного излучения на поверхность металла в течение короткого промежутка времени. Теплота распространяется вглубь металла, тонкий слой которого нагревается выше температуры аустенитных превращений; теплота сохраняется в течение времени, достаточного для растворения углерода. В период нагрева на поверхности формируются наибольшие градиенты температур. Это главное условие для быстрого охлаждения путем отвода теплоты вглубь металла. Как показано на рис. 1, упрочненная зона образуется вслед за перемещением луча лазера по поверхности металла.

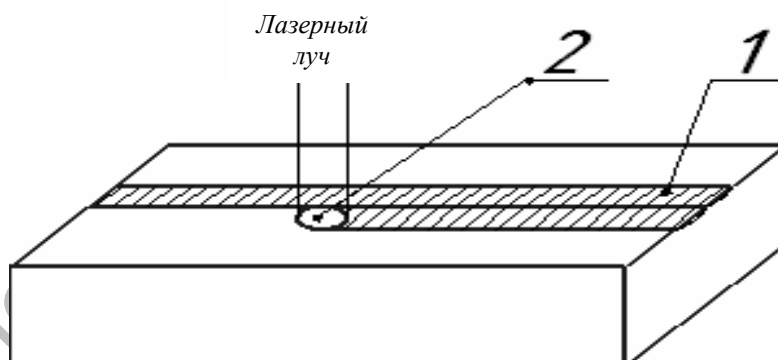


Рис. 1. Лазерная закалка металла: 1 – зона закалки; 2 – пятно фокусировки лазерного излучения

Полный цикл термообработки требует 1...2 с. Чаще всего необходимо избежать термоупрочнения изделия целиком. Максимальная глубина упрочненной лазером зоны, как правило, 1...2 мм. Обычно такой глубины достаточно для повышения износостойкости, прочности и усталостной сопротивляемости. При этом преимущество данного метода заключается в том, что свойства основного металла

остаются неизменными, в то время как твердость поверхности растет.

Обычные методы закалки, такие как поверхностная закалка пламенем, индукционная закалка, часто вызывают искажение формы металла, что необратимо портит изделие или требует больших затрат на доводку. Цементация и азотирование поверхности занимают много времени: для них требуется вы-

сокая точность поддержки газового состава. При этом нельзя обрабатывать большие площади.

Обнаружено, что лазерная термическая обработка имеет ряд достоинств по сравнению с обычными методами.

Основное преимущество быстрого нагрева тонкого поверхностного слоя состоит в том, что нет необходимости тратить энергию на прогревание всего объема материала. Зона теплового воздействия сокращается до минимума и обычно очень незначительна. Искажения поверхности также минимальны в сравнении с другими методами.

Благодаря простому управлению параметрами лазерного излучения, также легко можно управлять температурными полями приповерхностной зоны. Все это позволяет уменьшить температурные напряжения.

По сравнению с другими источниками тепла геометрия лазерного луча легко изменяется оптическими системами. Лазерный луч передается на расстояние, фокусируется или расширяется специальными линзами. Таким образом, диаметром луча можно управлять дистанционно. Его даже возможно разделять на несколько лучей и направлять одновременно на различные участки детали. Это свидетельствует о том, что лазерный луч легко может достигать труднодоступные места, включая внутренние поверхности полых изделий.

Возможна частичная закалка отдельных участков поверхности без затрагивания прилегающих. При этом быстро выбираются участки термоупрочнения в соответствии с заданной программой. Если необходимо закалить нужную поверхность, то она может быть обработана отдельными участками один за другим, как показано на рис. 1. Управляя параметрами процесса, можно избежать разрывов перекрытий закаленных зон.

Лазерный луч распространяется на большие расстояния благодаря низкой расходимости излучения. Он проникает через воздух и другие газы практически без потерь, не требует поддержания ва-

куума, как в случае электронного луча. Материал можно обрабатывать в газовой атмосфере любого состава. Нет необходимости в механическом контакте обрабатываемой детали с элементами лазерной установки.

Закалка не требует специального охлаждения такого, как водяное или масляное. Поверхность обрабатываемой поверхности остается чистой.

Практически всеми параметрами процесса можно управлять с помощью компьютера, поэтому термическая обработка легко осуществляется в автоматическом режиме [4].

### ***Закаливаемость сталей лазерным излучением***

Как правило, все сорта стали, которые закаляются обычными методами, могут закаляться и лазерами. Однако в случаях лазерного термоупрочнения большое значение имеет строение кристаллической решетки. Это необходимо знать перед лазерной термической обработкой. Время диффузии углерода очень мало, поэтому стали и чугуны с гомогенным распределением углерода наиболее подходят для лазерного термоупрочнения. Для быстрой аустенизации нужна перлитная или бейнитная кристаллическая структура. Низкоуглеродистые стали с содержанием углерода 0,3 % обычно не поддаются закаливанию. Максимальная твердость зависит от содержания углерода. Для того чтобы твердость увеличилась менее чем на 1 %, содержание углерода должно быть в пределах 2...3 %. Средне- и высокоуглеродистые стали оптимальны для лазерного термоупрочнения.

Количество легирующих элементов, таких как хром, марганец или молибден, влияют на закаливаемость. Зерна феррита могут не подвергаться закалке из-за недостаточной гомогенной аустенизации.

Для успешного лазерного термоупрочнения инструментальных сталей требуется специальная предварительная

обработка. Аустенитные и ферритные стали, не обнаруживающие  $\gamma$ - $\alpha$  фазовые переходы, не поддаются закалке [4].

В последнее время широкое развитие получил локальный нагрев обрабатываемого материала излучением лазера, что позволяет упрочнять локальные участки обрабатываемых изделий в местах их износа. При этом достигается твердость, превышающая твердость изделий после обычной термической обработки, а в неупрочненных участках сохраняются исходные свойства [8].

Сплошная лазерная закалка по всей рабочей поверхности детали не всегда является оптимальной. Согласно принципу Шарпи, структура из отдельных включений твердой, но хрупкой структурной составляющей в вязкой металлической матрице имеет высокие антифрикционные, противозадирные параметры и характеристики изнашивания. Наилучшие результаты по износостойкости будут иметь поверхности с сеткой закаленных лазерных дорожек, занимающей 20...25 % всей площади [9].

В зоне, обработанной лазерным лучом, наблюдаются участки с пониженной твердостью протяженностью 0,2...0,5 мм. Это подтверждает данные металлографических исследований, что переходная сильно травящаяся зона у края мениска при по-

вторном воздействии луча является зоной термического влияния. Разупрочненные участки обнаружены также и при исследовании распределения твердости по толщине упрочненного слоя.

Наличие участков с пониженной твердостью позволяет устранить трещинообразование при многократных нагревах и охлаждениях, характерных для обработки лучом лазера, так как это способствует релаксации напряжений, возникших при такой обработке [8].

### **Обсуждение результатов**

В общем случае микроструктуру материала, обработанного лазерным излучением, можно разделить на три зоны: целиком мартенситная зона; частично мартенситная зона; незакаленная зона. Иногда вблизи поверхности наблюдаются зоны с аустенитом. В тех случаях, когда температура поверхности превышает температуру плавления, происходит переплав поверхности, в результате которого образуется дендритная микроструктура. Структура зоны теплового воздействия, так же как и распределение твердости, зависит от начального состояния металла, химического состава и параметров процесса (рис. 2 и 3).

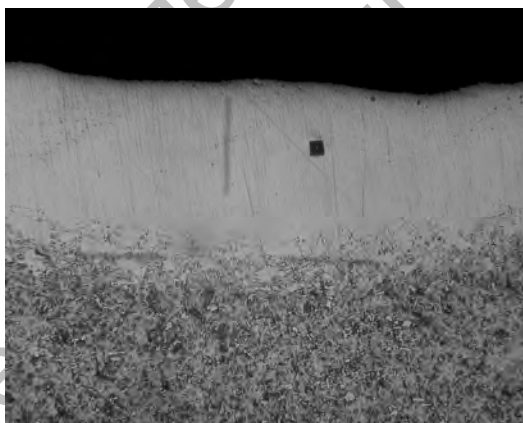


Рис. 2. Лазерная закалка с оплавлением поверхности

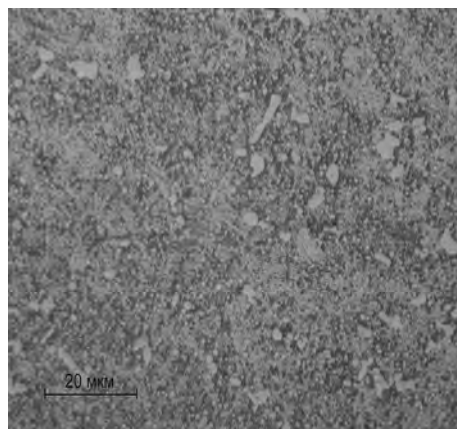


Рис. 3. Микроструктура стали X12M после закалки и отпуска

Эта зависимость очень многообразна и сложна. Далее приводятся важнейшие зависимости параметров лазерной закалки и получаемых результатов.

Основной целью лазерной закалки является получение максимальной глубины закаленной зоны при минимуме введенной энергии и минимальных искажениях. Это означает, что материал необходимо очень быстро нагревать для создания большого градиента температур и скорости охлаждения. Градиент температур ограничивается значением температуры поверхности, которая не должна превышать температуру плавления образца. С этой точки зрения эвтектический железоуглеродистый сплав из-за невысокой темпера-

туры плавления (около 1150 °С) мало подходит для лазерной закалки. Плавление некоторых сплавов, содержащих фосфор, начинается при еще более низкой температуре. С ограничением интервала температур аустенитизации глубина закаленной зоны также ограничивается. Кроме того, скорости самоохлаждения должны быть достаточно большими. По этим причинам максимальная глубина зоны закалки серого чугуна не превышает 1,5 мм. Распределение твердости в зоне закалки обработанного лазером чугуна приведено на рис. 4. Глубина закалки зависит от скорости перемещения лазерного луча.

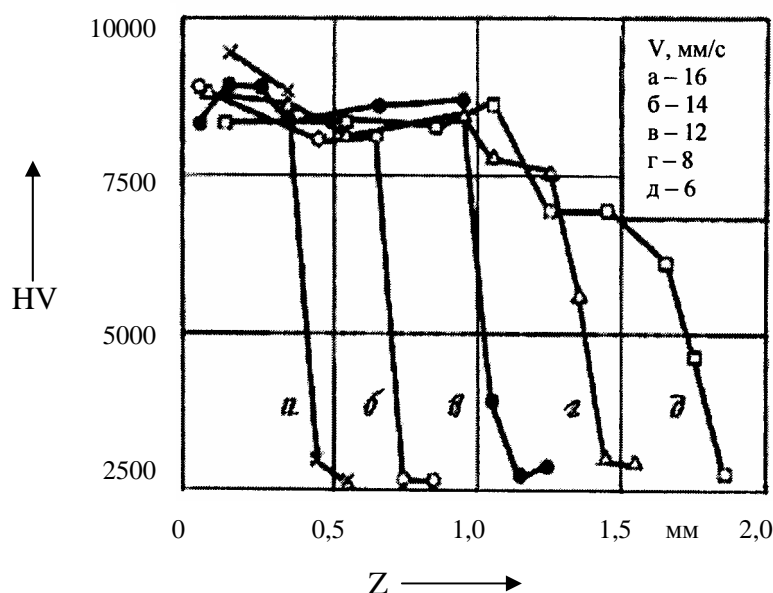


Рис. 4. Зависимость изменения твердости HV от глубины зоны Z с изменением скорости перемещения лазерного излучения V

Переходная зона в однородной углеродсодержащей кристаллической решетке узкая. Глубина зоны закалки находится в прямой зависимости от плотности мощности. Тем не менее глубина зоны закалки не может беспредельно увеличиваться с увеличением мощности лазерного излучения. При очень высоких мощностях аустенит нагревается выше температуры плавления, формирование мартенситной

структуры задерживается, и образуется мартенсит с дополнительными включениями аустенита. Твердость, прочность и усталостная сопротивляемость такого материала намного ниже, чем однородного мартенсита.

Вычисление параметров процесса позволяет установить, что с ростом плотности мощности и уменьшением относительных скоростей перемещения

лазерного излучения скорости охлаждения падают. Поэтому мартенсит, образующийся при высоких температурах, отпускается во время дальнейшего охлаждения, и твердость уменьшается по сравнению с быстро охлажденным материалом. Большие скорости закалки обеспечивают образование белого мартенсита. Во многих случаях твердость зоны лазерной закалки превышает твердость обычной закаленной зоны, полученной при медленном охлаждении. Очевидно, что максимальная твердость соответствует меньшим скоростям пере-

мещения лазерного луча. Это происходит потому, что однородность аустенита и растворимость углерода повышаются. При дальнейшем снижении скорости перемещения глубина зоны закалки растет, но твердость уменьшается. С падением скорости уменьшение твердости поверхности можно объяснить наличием остаточного аустенита в прогревом слое. Максимальная твердость поверхности достигается только с увеличением скорости закалки стали 1053 (рис. 5).

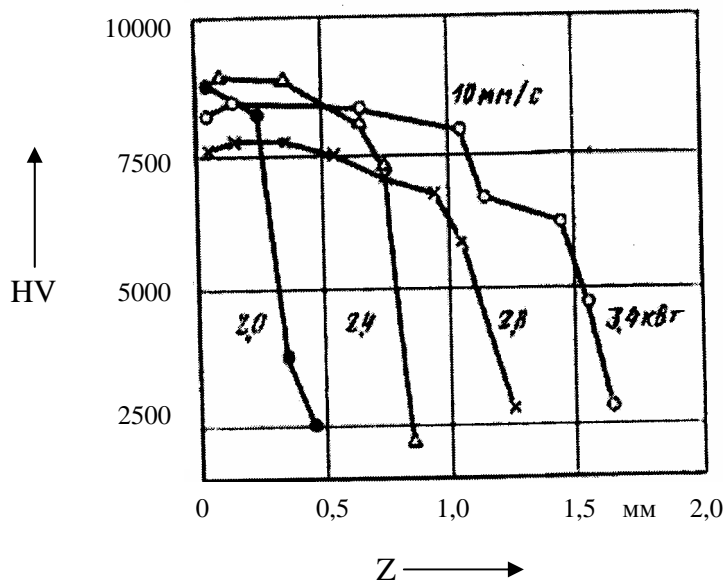


Рис. 5. Зависимость изменения твердости HV стали 1053 от глубины Z зоны закалки для четырех значений мощности излучения

Твердость, в основном, определяется характером превращений. Поэтому при одинаковых параметрах процесса высокоуглеродистая сталь закаливается лучше, чем низкоуглеродистая, в силу более низких температур превращений. Для получения одинаковых глубин закаленных зон необходимо повышать скорость перемещения источника энергии. Это очень важно при выборе такого материала для лазерного термоупрочнения, стоимость обычной закалки которого мала. Материалы с кристаллической структурой, близкой к эвтектической, инстру-

ментальные стали, перлитный серый чугун гомогенизируются легче, чем, например, сталь 1053, ввиду высокого содержания углерода (рис. 6). Поэтому они имеют относительно узкую переходную зону. У стали с низким содержанием углерода плавно повышается твердость, особенно при закалке обычными методами. Подобный эффект наблюдается у высокоуглеродистых сталей, если они содержат включения, подобные хрому, которые уменьшают однородность структуры. В этом случае количество растворенного углерода во

время короткого температурного цикла меньше, чем обычно (рис. 7). При одинаковых параметрах процесса и глубинах

зон заковки скорость заковки серого чугуна выше благодаря более быстрой гомогенизации.

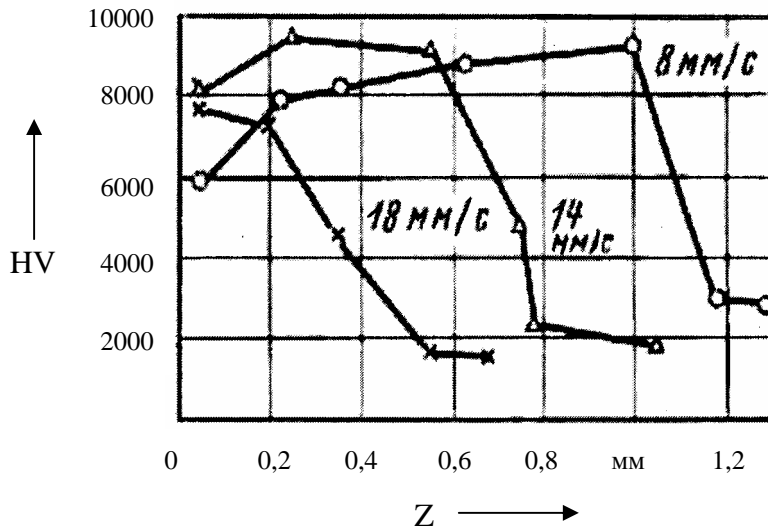


Рис. 6. Зависимость изменения твердости HV стали 1053 от глубины Z зоны при обработке лазерным излучением мощностью 3 кВт с различными скоростями перемещения

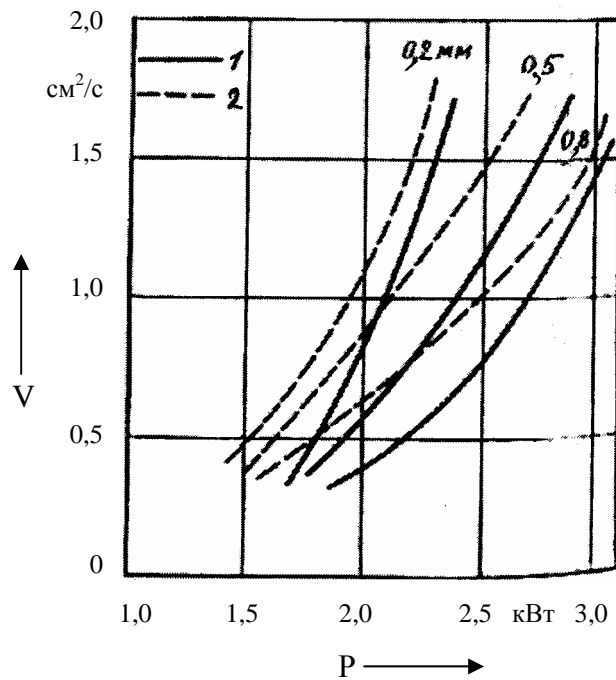


Рис. 7. Скорости заковки стали 1045 (1) и перлитного серого чугуна (2) при различной мощности лазера P

Хотя высокоуглеродистые стали закаливаются эффективнее, чем низкоуглеродистые, они часто содержат большое

количество аустенитных включений, что зависит от предварительной термообработки детали. Если для заэвтекто-



идных сталей температура аустенитизации выбирается в  $\gamma$ -области выше  $A_{сm}$ , величина аустенитных включений будет высокой, а твердость уменьшится. При аустенитизации на низких температурах между  $A_{с1}$  и  $A_{сr}$  содержание аустенита невелико, однако остаются нерастворенные примеси.

Если некоторая поверхность последовательно закаливается соприкасающимися, перекрывающимися или перекрещивающимися зонами, необходимо исследовать места наложения зон, так как их свойства отличаются от свойств зон закалки. Это такие свойства, как твердость, коррозионная стойкость, усталостная сопротивляемость. Граница зоны закалки определяется посто-

янно уменьшающейся температурой и формируется; превращение аустенита там поддерживается длительным воздействием требуемой температуры. В пограничной области температура сохраняется ниже температуры превращения. Лазерный луч может отпускать мартенситную границу близкорасположенной закаленной зоны. Обычно требуется очень короткое время отпуска для начала распада метастабильной структуры закалки, и в этой зоне твердость мартенсита значительно понижается. Таким образом, зоны лазерной закалки будут содержать узкие полосы с пониженной твердостью (рис. 8).

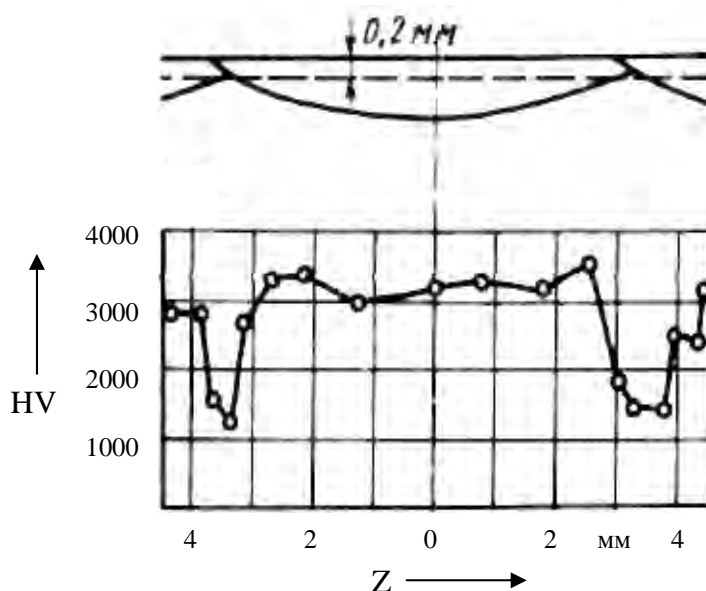


Рис. 8. Области пониженной твердости HV при наложении зон закалки; материал: перлитный серый чугун; измерено на глубине 0,2 мм

В случае лазерной закалки серого чугуна с перлитной поверхностной структурой твердость в зонах теплового воздействия шириной 0,5 мм понижается до 450...500 HV, что превышает твердость исходного материала. Этот эффект проявляется отчетливее в структурах с меньшей термодинамической стабильностью, т. е. там, где материал был охлажден очень быстро или имел перед лазерной обработкой меньшую температуру отпуска. Вот поче-

му в сильноотпущенных сталях твердость зоны лазерной закалки может оказаться ниже твердости исходного материала.

Для предотвращения этого явления лазерное излучение должно фокусироваться так, чтобы получалась как можно более широкая зона закалки. В этом случае уменьшается количество перекрытий зон закалки. Лазерный луч можно сфокусировать с помощью опи-

санных выше систем таким образом, чтобы уменьшить краевые эффекты и, следовательно, сократить ширину зоны отпуска. В таком случае зона отпуска будет минимальна и будет зависеть от теплопроводности образца.

#### **Выводы, цель и задачи проведения дальнейших исследований**

Проведенные предварительные исследования структуры и физико-механических свойств материалов штамповой оснастки на РПУП «Завод «Измеритель» позволяют однозначно сказать, что острая проблема упрочнения рабочих поверхностей инструмента может быть решена одним из наиболее эффективных методов упрочнения и повышения стойкости рабочего штампового инструмента – лазерной закалкой.

Научная, экспериментальная и теоретическая базы для этого уже существуют: на предприятии имеются две лазерные установки «Квант-15» и лаборатория, позволяющая исследовать структуру и свойства закаленного слоя.

Целью дальнейших исследований является внедрение технологии лазерного упрочнения на предприятии РПУП «Завод «Измеритель» для повышения стойкости рабочего инструмента штамповой оснастки.

Задачами дальнейшей работы являются:

- изучение механических свойств

закаленного слоя;

- изучение структур приповерхностного слоя;
- влияние перекрытия на однородность структуры на поверхности;
- промышленная апробация заковки на РПУП «Завод «Измеритель».

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Обработка металлов давлением в машиностроении / П. И. Полухин [и др.]. – М. : Машиностроение, 1983. – 279 с. : ил.
2. Молодык, Н. В. Восстановление деталей машин : справочник / Н. В. Молодык, А. С. Зенкин. – М. : Машиностроение, 1989. – 480 с.
3. Геллер, Ю. А. Инструментальные стали / Ю. А. Геллер. – М. : Металлургия, 1975. – 584 с.
4. Поляк, М. С. Технология упрочнения. Технологические методы упрочнения : в 2 т. / М. С. Поляк. – М. : Машиностроение, 1995. – Т. 1. – 832 с. : ил.
5. Чаус, А. С. Влияние модифицирования на структуру и свойства W–Mo быстрорежущих сталей / А. С. Чаус, Ф. И. Рудницкий // МиТОМ. – 1989. – № 6. – С. 27–33.
6. Романовский, В. П. Справочник по холодной штамповке / В. П. Романовский. – Л. : Машиностроение, 1971. – 782 с.
7. Справочник по лазерной технике : пер. с нем. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 544 с.
8. Луценко, Т. И. Лазерная закалка инструмента / Т. И. Луценко // Металловедение и термообработка материала. – 1982. – № 9.
9. Абильситова, Г. А. Технологические лазеры : справочник в 2 т. Т. 1 : Расчет, проектирование и эксплуатация / Г. А. Абильситова. – М. : Машиностроение, 1991. – 432 с.

Полоцкий государственный университет;  
РПУП «Завод «Измеритель»  
Материал поступил 18.02.2008

**A. L. Lisovsky, I. V. Pletenev**  
**Laser hardening of press tools**

Information about possible use of laser hardening to decrease mechanical wear of surface of press tools for example moulds and punches is given in the article. Analysis of provision ways of serviceability of press tools, materials and influence of alloyed elements on their properties is given in the paper. Characteristics of laser rays, equipment for laser hardening and influence of treatment modes on properties of a hardened surface are presented.