

ПОВЕРХНОСТНАЯ ЛАЗЕРНАЯ ОБРАБОТКА ШТАМПОВОГО ИНСТРУМЕНТА

А.И. Прохорова, Т.И. Балькова

В статье представлены результаты исследования структуры и свойств поверхностного слоя термообработанных вырубных штампов из стали X12M, упрочненного лазерной обработкой при различных режимах: изменении напряжения накачки лазера, степени расфокусировки луча, частоты следования импульсов, степени перекрытия пятен и дорожек. Лазерная обработка проводилась с оплавлением поверхности стали и без оплавления. Показано, что при лазерной обработке без оплавления поверхности происходит затупление кромки штампа. Упрочнение рабочих кромок необходимо проводить в режиме с микроплавлением. В этом случае зона лазерного воздействия на всех образцах имеет форму сегмента и состоит из трех слоев: зоны оплавления, зоны закалки и зоны отпуска, которая является переходной к основному металлу. Толщина зоны закалки практически не зависит от энергии лазерного излучения и составляет 40–45 мкм. Приведены рекомендации для упрочнения штампового инструмента сложной формы. Результаты испытаний показали стабильное повышение стойкости вырубных штампов после лазерного термоупрочнения в 2–4 раза.

Ключевые слова: штамповый инструмент, лазерная обработка, зона закалки, микроплавление, структура, микротвердость, стойкость штампов, поверхностный слой.

SURFACE TREATMENT LASER PUNCHING TOOLS

A.I. Prokhorova, T.I. Balkova

The article presents the study results of the structure and properties of the punching tools surface layer made from steel X12M and reinforced by laser processing in different modes. The voltage of the pumping laser, changes the voltage of the pump laser, the degree of beam defocusing, the pulse repetition frequency and the degree of overlap of spots and tracks were being changed during processing. Laser treatment was performed with reflow of steel surface and without reflow. It is shown that in the case of laser treatment without surface melting, the die edge is blunted. Hardening of working edges must be carried out in a mode of microfusion. In this case, the laser exposure zone on all samples has a shape of a segment and consists of three layers: reflow zone, quench zone and tempering zone, which is transitional to a base metal. Thickness of a hardening zone is 40–45 μm and almost doesn't depend on laser radiation energy.

Recommendations for strengthening the punching tools of complex shape were formulated. Results of tests presented a stable increase in durability of punching tools after laser thermostrengthening in 2–4 times.

Keywords: punching tool, laser treatment, hardening zone, micro-melting, structure, microhardness, die durability, surface layer.

Введение

Одной из актуальных проблем машиностроения является разработка эффективных технологий обработки, позволяющих обеспечить производство деталей с требуемыми свойствами рабочих поверхностей. Применение лазерных технологий [1–6] способствует повышению износостойкости, коррозионной стойкости, снижению времени длительности термической обработки, а также улучшению

других технологических характеристик, которые позволяют повысить качество, долговечность и эффективность работы деталей, а также КПД изготавливаемых машин и приборов [7–13]. К возможным технологическим способам обработки деталей, которые можно осуществлять с помощью лазера, относятся: поверхностная закалка, легирование, наплавка, сварка, размерная обработка, химико-термическая обработка.

Анализ выполненных работ по лазерной обработке сталей показывает, что наиболее перспективно применение лазера в тех областях, где долговечность изделия, оснастки и инструмента определяется износостойкостью и усталостной прочностью. Повышение надежности и долговечности штампового инструмента является серьезной проблемой, особенно в связи с расширением использования автоматических линий, обрабатывающих центров, станков с ЧПУ, внедрением гибких автоматизированных систем. Лазерное упрочнение позволяет снизить износ инструмента путем повышения поверхностной твердости при сохранении общей высокой динамической прочности, повышения теплостойкости, снижения коэффициента трения пары штамп–заготовка [2, 11, 14–18].

Стойкость инструмента зависит от конструктивных и технологических условий, среди них определяющими являются твердость и состояние рабочей кромки штампа. Инструмент для холодного деформирования работает при высоких удельных давлениях (до 2500 МПа) и сравнительно небольших температурах разогрева (200–400 °С). В таких условиях выход из строя штампового инструмента происходит вследствие хрупкого разрушения и растрескивания, циклических изменений температуры и высоких удельных давлений, а также в связи с изменениями геометрических размеров штампа из-за износа и смятия кромок. Высокая твердость поверхности и рабочей кромки штампа – необходимое условие обеспечения износостойкости при абразивном износе.

Стали для штампов холодного деформирования должны отвечать следующим требованиям:

- высокое сопротивление пластической деформации (смятию) и высокая износостойкость, что достигается за счет высокой твердости (HRC 56–60) при оптимальной структуре, содержащей избыточную карбидную фазу;
- достаточная вязкость, что обеспечивает высокое сопротивление хрупкому разрушению при динамических нагрузках;
- термостойкость (до 400–500 °С) при тяжелых условиях деформирования.

Кроме того, для сталей, используемых для изготовления штампов холодного деформирования, важен комплекс технологических свойств: шлифуемость, хорошая обрабатываемость резанием, устойчивость к обезуглероживанию, малые деформации при операциях термической обработки, закаливается и прокаливаемость.

Для разработки технологии лазерного упрочнения штампового инструмента необходимы данные, позволяющие выяснить закономерности изменения характеристик изделия при воздействии излучения. Такими характеристиками являются: геометрия рабочих кромок, распределение микротвердости, степень однородности и фазовый состав зоны термического влияния (ЗТВ).

Целью данной работы является выбор оптимального режима дополнительного упрочнения рабочих кромок термообработанных вырубных штампов из стали X12M с помощью лазерной установки «Квант-15» и разработка рекомендаций для лазерного упрочнения рабочей поверхности вырубных штампов применительно к заводским условиям.

Методика эксперимента

Изготовленные шлифованные образцы из стали X12M подвергали предварительной объемной термообработке, которая заключалась в закалке от температуры 1050 °С с последующим низкотемпературным отпуском при 180 °С. Затем проводили лазерную обработку образцов на установке импульсного действия «Квант-15» для двух вариантов: с оплавлением поверхности и без оплавления поверхности.

При лазерной обработке изменяемыми параметрами являлись напряжение накачки U_n лазера, степень расфокусировки α и частота импульсов ν . При обработке варьировали величиной напряжения накачки от 350 до 700 В, степенью расфокусировки луча от 8° до 18°, частотой следования импульсов от 2 до 10 Гц, а также степенью перекрытия пятен и дорожек Δ от 15–25 % до 50–60 %.

Лазерная обработка без оплавления поверхности

Рассмотрим процесс выбора оптимального режима лазерной обработки поверхности для двух случаев – без оплавления и с оплавлением поверхности.

Из литературных данных [2, 6, 13] известно, что при лазерной закалке сталей типа X12M (ледебуритного класса) структура и твердость зоны закалки зависят от температуры нагрева, причем эта зависимость экстремальная. Существует оптимальный режим облучения (оптимальная температура нагрева поверхности), при которой образуется структура «мартенсит + аустенит + карбиды» и достигается наибольшая

твердость. При меньшей температуре нагрева под закалку не обеспечивается достаточно полное растворение вторичных карбидов в аустените. Поэтому содержание углерода в аустените (после охлаждения – в мартенсите) мало, что влияет на величину твердости. Напротив, при очень высоких (предплавильных) температурах нагрева растворение вторичных карбидов в аустените столь значительно, что из-за большой степени насыщения углеродом и легирующими элементами мартенситный интервал понижается, и в структуре сохраняется большое количество остаточного аустенита. Следствием этого является, как и в предыдущем случае, низкая твердость.

Таким образом, выбор оптимального режима обработки предполагает нахождение таких параметров облучения, когда происходит необходимое и достаточное растворение вторичных карбидов в аустените.

Поскольку лазерное излучение характеризуется нестабильностью, облучение обычно проводят не в оптимальном, а в субкритическом (предплавильном) режиме, уточняя в каждом конкретном случае параметры обработки в зависимости от марки материала, шероховатости

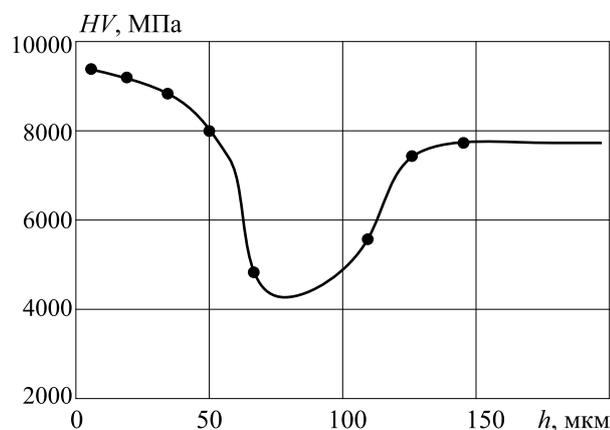


Рис. 1. Зависимость микротвердости HV от глубины упрочненного слоя h при лазерной обработке стали без оплавления поверхности

поверхности, особенностей лазерной установки и т.д.

При выполнении данного исследования был принят следующий режим: облучение с большим энерговыделением до оплавления поверхности и последующее снижение напряжения накачки лазера до требуемого значения (при неизменных α и ν). Так, при опробованных напряжениях накачки U_H с 370 до 350 В с интервалом 5 В при постоянных $\alpha = 8^\circ$ и $\nu = 5$ Гц, только один режим $U_H = 360$ В обеспечивает лазерную закалку без оплавления поверхности. При $U_H = 350$ В и $U_H = 355$ В зоны лазерного воздействия не выявляются, структура и твердость поверхностного слоя не изменяются. Характерно, что при этих режимах не изменяется даже цвет поверхности металла, что также является косвенным признаком недостаточной энергии облучения. При напряжениях накачки $U_H = 365$ В и $U_H = 370$ В происходит оплавление поверхности, легко выявляемое оператором установки непосредственно во время облучения.

Таким образом, зона лазерного воздействия, полученная в предплавильном режиме ($U_H = 360$ В, $\alpha = 8^\circ$, $\nu = 5$ Гц), имеет следующее строение: у поверхности расположена зона закалки, ниже – зона отпуска, которая является переходом к основному металлу. Характеристика зон дана в таблице 1.

Зона отпуска с пониженной твердостью образуется при нагреве стали до температур критической точки A_{c1} . При этом происходит распад мартенсита и коагуляция карбидов.

Изменение микротвердости по глубине упрочненного слоя показано на рис. 1.

Учитывая полученные результаты, можно утверждать, что эффективность упрочнения рабочих кромок инструмента должна зависеть от относительной площади разупрочненных зон (зон отпуска) на обрабатываемой поверхности. Образование таких участков на рабочих кромках вырубных штампов нежелательно, так

Таблица 1

Характеристика зон лазерного воздействия на стали X12M

Режим облучения $U_H = 360$ В, $\alpha = 8^\circ$, $\nu = 5$ Гц	Наименование зоны	Толщина зоны h , мкм	HV, МПа
	Зона закалки	40–45	9000–9500
	Зона отпуска	10–15	5300–5500
	Основа	–	6500–6800

как это может привести к ускоренному местному износу, увеличению зазора и образованию вследствие этого недопустимого заусенца на деталях.

Можно ожидать, что результаты лазерной закалки должны зависеть от частоты импульсов (при прочих равных условиях). Действительно, при изменении частоты импульсов изменяется твердость закаленной зоны: чем больше частота, тем ниже твердость в зоне закалки (табл. 2).

Данные таблицы свидетельствуют, что наиболее приемлемой является частота 2 Гц. Толщина зоны закалки практически не изменяется. Понижение твердости при увеличении частоты связано с изменением условий теплоотвода.

При большой частоте следования импульсов, из-за сильного влияния разогрева каждого последующего участка уменьшаются скорость охлаждения в предыдущих зонах лазерного воздействия.

Проведенные исследования позволили уточнить и скорректировать режим лазерной обработки без оплавления поверхности для стали X12M, который был принят следующим: $U_n = 360$ В, $\nu = 2$ Гц, $\alpha = 8^\circ$, перекрытие пятен $\Delta = 25\%$.

По указанным режимам была обработана партия вырубных штампов и проведены производственные испытания. Установлено, что эксплуатационная стойкость штампов, упрочненных по предложенному режиму, нестабильна и изменяется от 0,3 до 4 (за единицу принята стойкость штампов без лазерного упрочнения).

Для установления причин нестабильной стойкости штампов были проведены сравнительные исследования структуры металла в районе рабочей кромки и на некотором расстоянии от нее. Установлено, что геометрия



Рис. 2. Нарушение геометрии кромки при лазерной закалке ($\times 100$)

обрабатываемой поверхности оказывает существенное влияние на результаты обработки.

На поперечных шлифах, выполненных по центру пятна лазерного воздействия, обнаружено скругление (затупление) кромки. Изменение геометрии углов хорошо видно на рис. 2.

Характерно, что по сечению периферийных зон лазерного пятна изменение геометрии кромки значительно меньше, поэтому не всегда может быть обнаружено обычными исследованиями (приготовления шлифа по центру пятна при импульсной обработке затруднено).

Как видно из рис. 2, радиус закругления кромки составляет примерно 50 мкм, что недопустимо для вырубных штампов. Причиной затупления кромки является, очевидно, повышенная плотность мощности лазерного излучения в центре пятна. И если на расстоянии, большем диаметра пятна от кромки, неоднородность в распределении мощности лазерного излучения почти не отражается на степени оплавления, то в районе кромки заметную роль играют граничные условия, влияющие на теплообмен. Поскольку на границе «металл–воздух» теплопроводность резко уменьшается, то поглощение энергии металлом на этих участках зна-

Таблица 2

Микротвердость зон лазерного воздействия стали X12M в зависимости от частоты импульсов

Частота импульсов ν , Гц	Микротвердость HV, МПа		Глубина зоны закалки h , мкм
	Зона закалки	Зона отпуска	
2	9000–10800	5300–5500	40–80
4	8900–9500	5300–5500	40–80
5	9000–9500	5300–5500	60–80
10	7100–8500	5300–5500	70–80

чительно больше, чем на участках, удаленных от кромки. При большей плотности мощности лазерное излучение может вызвать оплавление и даже испарение металла на острой кромке.

Для восстановления кромки требуется дополнительная шлифовка поверхности штампа. Однако при этом теряются все преимущества лазерной обработки без оплавления. Кроме того, из-за малой толщины упрочненного закаленного слоя невозможно гарантировать его сохранность после шлифования.

Отсюда следует вывод: лазерную обработку без оплавления поверхности нецелесообразно применять для упрочнения вырубных штампов со сложной геометрией рабочих кромок, так как из-за неравномерности распределения лазерного излучения на отдельных участках происходит затупление кромки.

Лазерная обработка с оплавлением поверхности

Установлено, что при обработке с оплавлением зона лазерного воздействия (ЗЛВ) на всех образцах имеет форму сегмента и состоит из трех слоев: зоны оплавления, зоны закалки и зоны отпуска, которая является переходной к основному металлу. Характеристика ЗЛВ представлена в табл. 3.

Зона оплавления выявляется в виде светлой нетравящейся полоски и имеет структуру преимущественно аустенита, который сохраняется до комнатной температуры благодаря большой степени легированности из-за растворения карбидов. Толщина аустенитного слоя зависит от энергии лазерного излучения и увеличивается при росте напряжения. Микротвердость зоны оплавления не велика и составляет 4500–4900 МПа, что значительно ниже исход-

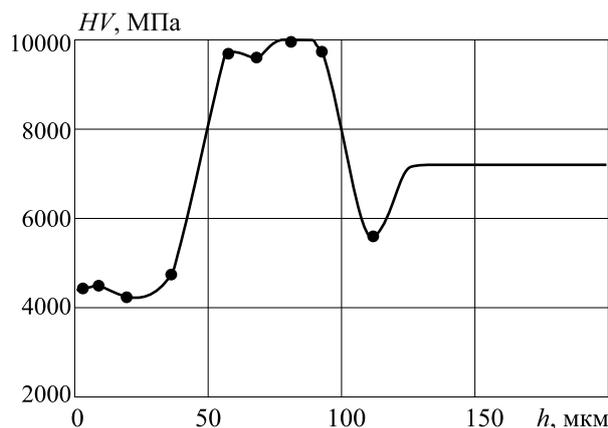


Рис. 3. Изменение микротвердости HV по глубине упрочненного слоя h при лазерной обработке стали с оплавлением поверхности

ной твердости стали X12M (рис. 3). Увеличение толщины этой зоны не приводит к изменению микроструктуры и твердости.

Можно утверждать, что из-за низкой твердости слой с аустенитной структурой недопустим на рабочей поверхности штампа, т.е. в технологии обработки после лазерного облучения должна быть предусмотрена операция шлифования для полного съема разупрочненного слоя.

Зона лазерной закалки расположена под оплавленным слоем. Высокая микротвердость (9000–10200 МПа) обусловлена мартенсито-аустенитной структурой и нерастворившимися карбидами. Толщина зоны закалки практически не зависит от энергии лазерного излучения и для стали X12M составляет 40–45 мкм.

Твердость металла зоны отпуска, расположенной в зоне лазерного воздействия, несколько выше, чем после объемной термообработки (закалки и высокого отпуска), однако значительно ниже твердости основного металла (закаленного и низкоотпущенного).

Таблица 3

Характеристика зон лазерного воздействия

Режим обработки	Наименование ЗЛВ	Толщина слоя h , мкм	HV, МПа
$U_n = 360$ В, $\alpha = 8^\circ$, $\nu = 2$ Гц	Зона оплавления	30	4500–4900
	Зона закалки	40	9000–10200
	Зона отпуска	10	5300–5500
$U_n = 700$ В, $\alpha = 8^\circ$, $\nu = 2$ Гц	Зона оплавления	800	4500–4900
	Зона закалки	40	9000–10200
	Зона отпуска	10	5300–5500
–	Основа	–	6300–6500

На микрошлифе зона отпуска выявляется по более темному контрасту травления и имеет толщину 10–15 мкм. Протяженность зон отпуска по упроченной поверхности после сошлифовывания мягкого оплавленного слоя должна оказывать большое влияние на работоспособность штампа.

Поскольку невозможна лазерная обработка, при которой не образуются зоны отпуска в области перекрытия пятен и дорожек, необходимо подобрать такой режим облучения, когда суммарная площадь зон отпуска минимальна. Обработка без перекрытия пятен нецелесообразна, так как в этом случае на поверхность выходят зоны отпуска основы и значительная часть упроченной лазером матрицы.

При лазерной обработке с перекрытием оптимальным вариантом является степень перекрытия $\Delta = 25\%$, так как с увеличением перекрытия существенно увеличивается количество пятен на единицу площади и, как следствие, протяженность зон отпуска.

Следует отметить, что требуемая степень перекрытия ($\Delta = 25\%$) должна быть определена не по зоне оплавления, а по пятнам лазерной закалки, расположенным под зоной оплавления.

Известно, что при проведении лазерной обработки на импульсной установке перекрытие пятен устанавливает оператор при визуальном наблюдении поверхности. Если устанавливать перекрытие по пятнам оплавления, то после сошлифовывания оплавленного слоя вскрыется поверхность, на которой перекрытие пятен закалки не будет соответствовать исходному (заданному). Причем, чем больше толщина оплавленного слоя, тем больше будет это различие.

Экспериментально установлено, что для обеспечения перекрытия пятен $\Delta = 25\%$ по зоне закалки необходимо подбирать перекрытие пятен оплавления $\Delta = 50\%$ при толщине оплавленного слоя 30–40 мкм.

Влияние частоты импульсов рассмотрено выше. Показана зависимость твердости зоны закалки от частоты облучения. Наибольшую твердость обеспечивает частота следования импульсов $\nu = 2$ Гц.

Учитывая приведенные результаты, можно указать оптимальные параметры лазерной обработки с оплавлением поверхности: $U_H = U_{\min}$ (минимальное напряжение, обеспечивающее устойчивое оплавление поверхности), $\alpha = 8^\circ$, $\nu = 2$ Гц, $\Delta = 50\%$ (по пятнам оплавления).

После лазерной обработки рабочей поверхности штампа необходимо выполнить шлифование для полного снятия оплавленного слоя. Упроченной зоной является зона лазерной закалки с микротвердостью 9000–10200 МПа. Однако следует учитывать особенности энергопоглощения на острых кромках.

Установлено, что при обработке с оплавлением «эффект кромки» проявляется еще сильнее, если на кромку попадает центр лазерного пятна (рис. 4).

При обработке штампов со сложной формой гравюры количество таких участков, случайно попадающих на рабочую кромку, может быть значительным. В то же время, наличие даже одного «подтека» недопустимо, так как это неизбежно приведет к образованию заусенца на детали. Образование «подтеков» на кромках, безусловно, усложняет технологию упрочнения штампов: при сошлифовывании оплавленного слоя необходимо обеспечить и съём дефектных участков на кромках. Однако при малой толщине зоны закалки эта задача практически невыполнима. Кроме того, при сошлифовывании дефектных мест будет снят весь упроченный слой на остальной поверхности кромок.

Единственным выходом из этой тупиковой ситуации представляется подбор режима лазерной обработки, обеспечивающего значительно большую толщину закаленного слоя и более равномерное распределение плотности мощности в лазерном пятне. Варьированием двумя основными параметрами – напряжением (U_H) и расфокусировкой (α) – экспериментально установлено, что удовлетворительные результаты получаются при лазерной обработке расфокусированным лучом ($\alpha = 18^\circ$) при $U_H = 460$ В (минимальное напряжение, обеспечивающее работу установки в режиме оплавления).

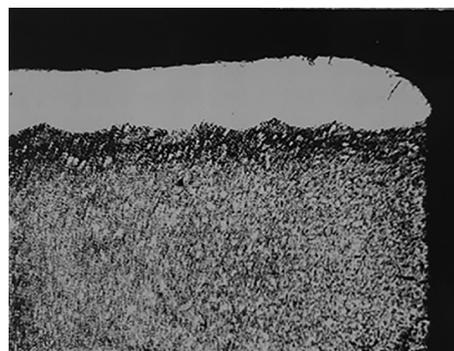


Рис. 4. Нарушение геометрической формы кромки образца ($\times 100$)



Рис. 5. Микроструктура ЗЛВ при степени расфокусировки $\alpha = 18^\circ$ ($\times 100$)

ния при заданной расфокусировке луча). В этом случае толщина закаленного слоя составляет примерно 90 мкм, т.е. в 2 раза больше зоны оплавления. Эффект «подтека» значительно меньше (рис. 5). Таким образом, упрочнение рабочих кромок необходимо проводить в режиме с оплавлением поверхности со следующими параметрами: $U_H = U_{\min}$ (минимальное напряжение, обеспечивающее стабильное оплавление поверхности), $\alpha = 18^\circ$, $\Delta = 50\%$ (по пятнам оплавления), $\nu = 2$ Гц.

После лазерной обработки с оплавлением поверхности следует операция шлифования оплавленного слоя. Поскольку энергетические параметры лазерных установок со временем изменяются, толщина оплавленного слоя также будет изменяться.

Контроль глубины оплавленного слоя

Разработка технологии лазерного термоупрочнения должна включать не только определение оптимальных параметров лазерной обработки, но и методику неразрушающего контроля глубины оплавленного слоя. Неразрушающий контроль возможен с помощью химических и физических методов.

Химические методы контроля заключаются в травлении поверхности штампа различными кислотами и выявлении оплавленного слоя, имеющего аустенитную структуру, по окрашиванию его в определенный цвет. Однако применение этих методов затруднено вследствие токсичности кислот.

Быстрым и вполне точным методом неразрушающего контроля является физический вихре-токовый метод. В основе вихре-токовых методов лежит зависимость интенсивности и распре-

деления вихревых токов в объекте контроля от его основных параметров. Переменный ток, действующий в катушках вихре-токового преобразователя (ВТП), создает электромагнитное поле, которое возбуждает вихревые токи в электропроводящем объекте контроля. Если ферромагнитный объект контроля не имеет парамагнитного покрытия, то вихревые токи, возникающие в исследуемом объекте и катушках ВТП, будут равны, и установленный в блоке измерения цифровой индикатор покажет ноль. При появлении парамагнитной прослойки изменится амплитуда и фаза вихревого тока в объекте контроля. По изменению амплитудно-фазовых характеристик микропроцессор прибора вычисляет глубину оплавленного слоя, которая отображается на цифровом индикаторе.

Установленный в блоке измерения цифровой индикатор покажет глубину проникновения вихревых токов.

В качестве прибора для неразрушающего контроля толщины снимаемого оплавленного слоя можно применять толщиномеры для парамагнитных покрытий на ферромагнитной основе. В работе использовался толщиномер типа МТ-101 [19], который предназначен для измерения толщины немагнитных покрытий на деталях из ферромагнитных сталей. На жидкокристаллическом индикаторе отображается число, равное значению измеряемой толщины покрытия, выраженному в мкм.

Учитывая приведенные выше результаты и указанную методику неразрушающего контроля, можно предложить следующую последовательность операций лазерного термоупрочнения вырубных штампов:

- 1) шлифование;
- 2) лазерное термоупрочнение по режиму $\nu = 2$ Гц, $\alpha = 18^\circ$, перекрытие пятен 50 %, U_H подбирается как минимальное напряжение, обеспечивающее стабильное оплавление поверхности;
- 3) измерение толщины оплавленного слоя с помощью толщиномера;
- 4) сьем оплавленного слоя;
- 5) установка на пресс.

Данная последовательность операций положена в основу разработки технологии лазерного термоупрочнения штампов.

Предложенная технология была опробована в заводских условиях. Результаты испытания показали стабильное повышение стойкости штампов в 2–4 раза.

Выводы

1. Для упрочнения вырубных штампов со сложной геометрией рабочих кромок целесообразно применять лазерную обработку без оплавления поверхности, так как из-за неравномерности распределения лазерного излучения на отдельных участках происходит затупление кромок.

2. Упрочнение рабочих кромок необходимо проводить в режиме с микроплавлением поверхности при следующих параметрах облучения (для лазера импульсного действия «Квант-15»):

- напряжение $U_H = U_{\min}$ (минимальное напряжение, обеспечивающее стабильное оплавление поверхности);
- расфокусировка $\alpha = 18^\circ$;
- перекрытие между пятнами и дорожками $\Delta = 50\%$
- частота следования импульсов $\nu = 2$ Гц.

3. После обработки необходимо сошлифовать оплавленный слой, при этом толщину съема металла целесообразно контролировать с помощью толщиномера типа МТ-101 или аналогичного по принципу действия.

4. Результаты испытаний показали стабильное повышение стойкости вырубных штампов после лазерного термоупрочнения в 2–4 раза.

Заключение

Проведенные исследования по выбору оптимального режима дополнительного упрочнения рабочих кромок термообработанных вырубных штампов из стали Х12М с помощью лазерной обработки показали, что упрочнение рабочих кромок необходимо проводить в режиме с микроплавлением поверхности. Сформулированы рекомендации для упрочнения штампового инструмента сложной формы, которые могут быть использованы на машиностроительных предприятиях.

Список литературы

1. Рэди Дж.Ф. Промышленные применения лазеров. М.: Мир, 1981. – 638 с.
2. Технологические процессы лазерной обработки / под ред. А.Г. Григорьянца. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 664 с.
3. Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок / под ред. В.Я. Панченко. М.: Физматлит, 2009. – 664 с.

4. Осико В.В., Щербаков И.А. Твердотельные лазеры. Ч. I // Фотоника. 2013. № 3. С. 14–35.
5. Осико В.В., Щербаков И.А. Твердотельные лазеры. Ч. II // Фотоника. 2013. № 4. С. 24–44.
6. Григорьянц А.Г., Казарян М.А., Лябин Н.А. Лазерная прецизионная микрообработка материалов. М.: Изд-во Физматлит, 2017. – 416 с.
7. Майоров В.С. Лазерное упрочнение металлов // Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок / под ред. В.Я. Панченко. 2009. С. 439–469.
8. Майоров В.С., Майоров С.В. Закалка чугуновых деталей излучением твердотельного лазера // Металловедение и термическая обработка металлов. 2009. № 3 (645). С. 6–8.
9. Лазерная очистка и лазерный наклеп – технологии улучшения свойств поверхности / М. Волков, А. Кишалов, Н. Орлов, В. Серебряков, В. Смирнов, А. Филатов // Фотоника. 2014. № 3 (45). С. 34–44.
10. Ставрев Д.С., Щербаков В.С. Дисперсионное упрочнение слоя лазерной наплавки из мартенситно-старяющегося сплава на поверхности стали 3Х3М3Ф // Металловедение и термическая обработка металлов. 2016. № 6 (732). С. 65–69.
11. Формирование износостойкого хромоникелевого покрытия с особо высоким уровнем теплостойкости комбинированной лазерно-термической обработкой / А.В. Макаров, Н.Н. Соболева, И.Ю. Малыгина, А.Л. Осинцева // Металловедение и термическая обработка металлов. 2015. № 3 (717). С. 39–46.
12. Применение лазерной термической обработки для создания градиентных материалов на основе системы Fe-Cr-Ni / А.О. Андреев, М.П. Галкин, М.А. Либман, Миронов, В.Н. Петровский, Э.И. Эстрин // Металловедение и термическая обработка металлов. 2014. № 1 (703). С. 50–53.
13. The Behavior of Gas Powder Laser Clad NiCrBSi Coatings Under Contact Loading / R.A. Savrai, A.V. Makarov, N.N. Soboleva, I.Yu. Malygina, A.L. Osintseva // Journal of Materials Engineering and Performance. 2016. Vol. 25. No. 3. P. 1068–1075.
14. Легирование поверхности стали Х12М при обработке импульсным лазерным излучением / В.С. Постников, С.А. Белова, Ю.Н. Иванкин, М.Н. Игнатов. Режим доступа: <http://www.toolsru.com/docs/13-14/13-17.pdf> (дата обращения: 25.12.2013).

15. Повышение микромеханических свойств и износостойкости хромоникелевого лазерного покрытия финишной фрикционной обработкой / *А.В. Макаров, Н.Н. Соболева, Р.А. Саврай, И.Ю. Малыгина* // Вектор науки ТГУ. 2015. № 4 (34). С. 60–67.
16. Characteristics of Ni-based coating layer formed by laser and plasma cladding processes / *G. Xu, M. Kutsuna, Z. Liu, H. Zhang* // Materials Science and Engineering A. 2006. Vol. 417. P. 63–72.
17. Abrasive wear behavior of laser clad and flame sprayed-melted NiCrBSi coatings / *C. Navas, R. Colaco, J. De Damborenea, R. Vilar* // Surface and Coatings Technology. 2006. Vol. 200. P. 6854–6862.
18. Microstructure and dry sliding wear behavior of laser clad Ni-based alloy coating with the addition of SiC / *Q. Li, G.M. Song, Y.Z. Zhang, T.C. Lei, W.Z. Chen* // Wear. 2003. Vol. 254. P. 222–229.
19. Толщиномер магнитный МТ-101. Паспорт ПС-4276-006-52736667-04. М.: 2004. – 8 с.

Материал поступил в редакцию 18.03.2017

**ПРОХОРОВА
Александра Ивановна**

E-mail: prohorova-mami@mail.ru
Тел.: (495) 276-34-47

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Материаловедение» Московского политехнического университета. Сфера научных интересов – повышение долговечности материалов путем обработки их поверхности. Автор более 50 научных работ.

**БАЛЬКОВА
Татьяна Ивановна**

E-mail: balkova.ti@yandex.ru
Тел.: (495) 276-34-47

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Материаловедение» Московского политехнического университета. Сфера научных интересов – повышение долговечности материалов путем обработки их поверхности. Автор более 20 научных работ, двух изобретений.