



УДК 621.74

Поступила 22.01.2014

М. Л. КАЛИНИЧЕНКО, В. А. КАЛИНИЧЕНКО, С. В. ГРИГОРЬЕВ, М. А. КАРДАПОЛОВА, БНТУ

## МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СТАЛИ ТИПА Х12МФ ПОСЛЕ ЗАКАЛКИ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

*Статья связана с процессами лазерной обработки. Целью работы было оптимизировать технологические параметры процесса, которые бы уменьшили внутренние напряжения в поковке и улучшили бы качество поверхности. Анализ распределения элементов показывает их достаточно равномерное распределение в поверхностном слое. Полученные результаты имеют практическую ценность для оптимизации технологических параметров и выбора оптимальной структуры и, как результат, свойств.*

*The article is related to the processes of laser processing. The purpose of work was to optimize technological parameters of the process which would reduce internal tensions in forged piece and would improve quality of surface. The analysis of distribution of elements shows their rather uniform distribution in surface coating. The achieved results have practical importance for optimization of technological parameters and choice of optimal structure and as result of properties.*

### Введение

Целью работы являлось увеличение ресурса службы стали для холодной штамповки типа Х12МФ с помощью высокоэнергетического воздействия на ее рабочую поверхность. Для реализации данной задачи были использованы перспективные оптоволоконные лазеры и широко используемые на производстве СО<sub>2</sub>-лазеры. При выборе эффективного лазерного источника для упрочнения поверхностей необходимо учитывать не только влияние параметров лазерного луча, но и неоднородность структуры поверхностного слоя, наличие в нем карбидообразующих элементов. Далее сравниваются эффекты использования СО<sub>2</sub>-лазеров и оптоволоконных излучателей.

Штамповая сталь Х12МФ – это сталь холодного деформирования (ковки) с повышенным содержанием хрома, молибдена и ванадия. Она имеет хорошую теплостойкость, прочность и износостойкость, также обладает высокой прокаливаемостью и закаливаемостью, обрабатывается хорошо резанием и давлением. Имея в своем составе высокое содержание углерода, является достаточно жестким материалом. После закалки твердость достигает HRC 62–64. В стали Х12МФ содержится высокое количество карбидообразующих элементов, а высокое содержание углерода (С) и хрома (Cr) обеспечивает образование повышенного количества карбидов хрома, которое составляет порядка 20%. Главным легирующим элементом Х12МФ служит хром (Cr), который призван повысить ре-

жущие свойства и износостойкость, увеличить прочность и прокаливаемость стали. Однако при этом появляется резко выраженная карбидная неоднородность и повышенная склонность к коагуляции карбидов, которая способствует разупрочнению Х12МФ при нагреве. Ванадий (V), введенный в состав стали Х12МФ, существенно уменьшает чувствительность стали к перегреву, повышает ее теплостойкость и улучшает распределение частиц избыточной фазы.

Еще одним легирующим элементом в Х12МФ является молибден (Mo). Он вводится в высокохромистую сталь для увеличения ее вязкости и повышения прокаливаемости. Но так как молибден оказывает отрицательное влияние на окалиностойкость, то его содержание ограничивается 1,4–1,8%. Сталь Х12МФ можно отнести к полутеплостойким сталям. Она наиболее пригодна для изготовления пуансонов, штампов, роликов твердостью 45–52 HRC, предполагаемая температура эксплуатации которых допустима до 400–500 °С.

Исходя из [1–8], было решено использовать СО<sub>2</sub>-лазер импульсного действия типа Комета-2 и постоянный лазер оптоволоконного типа ЛС-2. Для СО<sub>2</sub>-лазера диаметр фокусного луча варьировал от 2 до 4 мм при скорости от 1000 до 2500 мм/мин и при мощности 1 кВт. Для ЛС-2 лазера диаметр фокусного луча варьировал от 2 до 4 мм при скорости от 800 до 1200 мм/мин и при мощности от 1,4 до 1,6 кВт.

**Анализ микроструктуры и распределение элементов по сечению образца**

Для построения матрицы экспериментов на первом этапе был проведен структурный анализ исходного образца (рис. 1). Из рис. 1, *a* видно, что сталь была получена литейным методом, после чего была покована с приложением усилия с верхней до нижней точки. Об этом свидетельствует деформация зерна в горизонтальном направлении. По границам зерен наблюдаются включения карбонизированного хрома, что является типичным для всех типов инструментальных сталей. На рис. 1, *a*, *б* показано распределение хрома и его карбидов в ферритной структуре матрицы. Для определения распределения элементов по сечению образца был проведен анализ по линии, указанной на рис. 1, *б*. Было выявлено, что исходный образец имеет достаточно равномерное распределение по кремнию, молибдену, ванадию и никелю, в то же время такие элементы, как хром и марганец, сосредоточиваются в виде конгломератов в отдельно взятых участках.

Штамповые стали, как и все виды упрочненных сталей, имеют высокую степень неоднород-

ности, что позволяет им сочетать в себе свойства твердости и пластичности. Для рассмотрения степени неоднородности состава дополнительно был произведен анализ элементов на площади 150×150 мкм. Исходя из рентгеноспектрального анализа, максимальные пики (рис. 2) относятся к формообразующему железу и основному модификатору хрому. По результатам исследований было установлено, что распределение железа находится в диапазоне 44–90%, при этом хром базируется в пределах 7–50% в зависимости от его расположения (чистое включение либо растворенный в основе), что показывает полную неоднородность по свойствам данного материала. Для гомогенизации структуры данный тип материала обязан проходить дополнительную обработку. С этой целью был изготовлен образец из исходного состава, который был подвергнут высокоэнергетическому воздействию с использованием оптоволоконного и CO<sub>2</sub>-лазеров.

Анализируя образец после обработки оптоволоконным лазером, нельзя не заметить высокое термическое воздействие лазерного излучения на материал (рис. 3, *a*, *б*). При этом следует отметить,

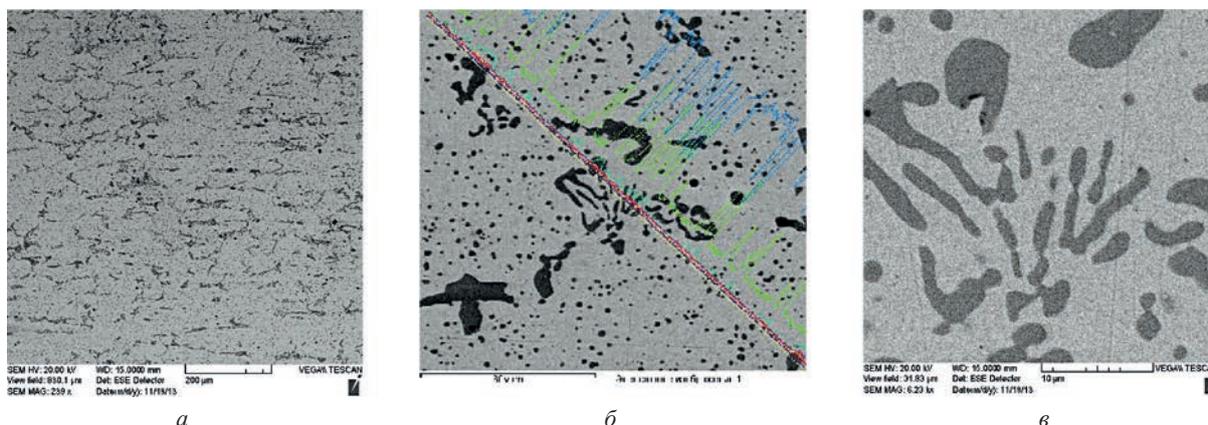


Рис. 1. Структура исходного образца: *a* – общий вид; *б* – дендритные образования феррохрома и линия анализа распределения элементов; *в* – типичный срез структуры с хромосодержащими дендритами

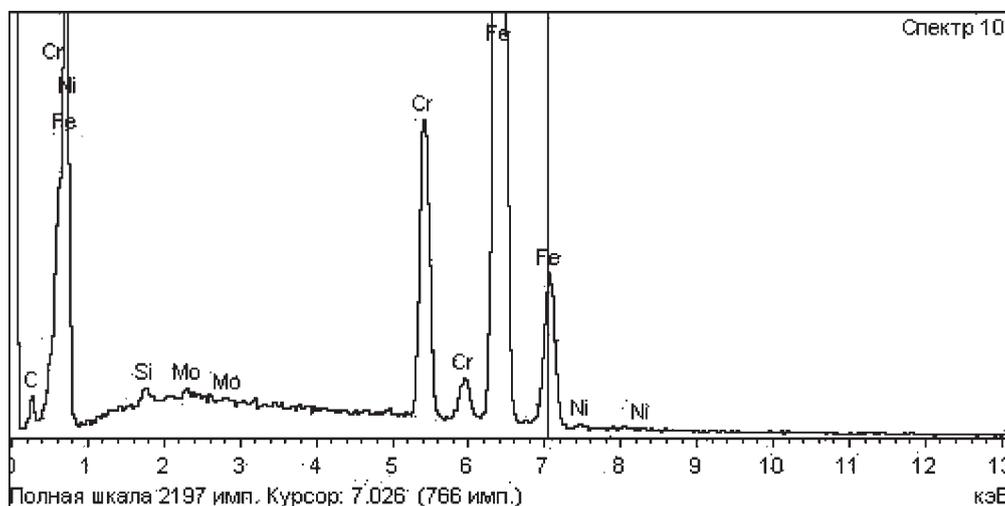


Рис. 2. Рентгеноспектральный анализ исходного образца на химический состав

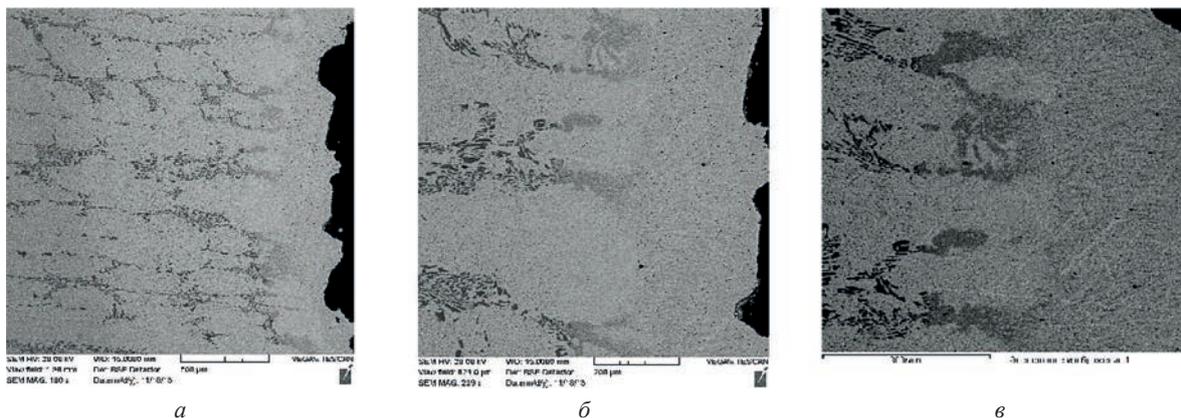


Рис. 3. Образец, обработанный оптоволоконным лазером при режиме  $d = 4$  мм,  $v = 1100$  мм/мин,  $P = 1,5$  кВт: *a* – общий вид; *б* – переходная зона от обработанной области к матричной зоне образца; *в* – точка для анализа распределения элементов в зоне обработки

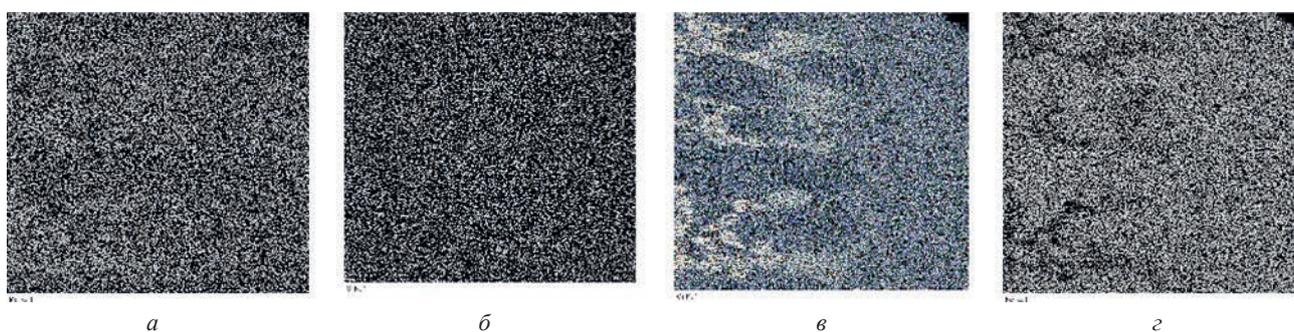


Рис. 4. Распределения элементов в зоне обработки: *a* – марганец; *б* – кремний; *в* – хром; *г* – железо

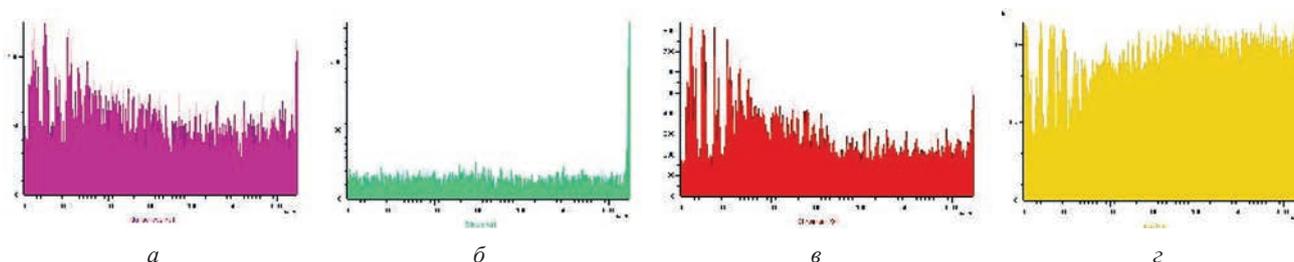


Рис. 5. Пики рентгеноспектрального анализа по основным элементам образца (см. рис. 4): *a* – марганец; *б* – кремний; *в* – хром; *г* – железо

что поверхность образца является достаточно ровной, соответствует требованиям шероховатости поверхности, соответствующей классу чистовой обработки. Из рис. 3, *б* заметна полная гомогенизация материала в зоне, подвергшейся облучению и наблюдаются равномерное распределение хром-содержащих частиц в зоне обработки и крупные частицы в зоне, не попавшей в область термоудара. Для проверки качества гомогенизации основных элементов данной стали был проведен анализ распределения элементов по площади шлифа. Для этого была выбрана производная точка (рис. 3, *в*). По завершению анализа было выявлено (рис. 4), что распределение кремния, никеля, марганца, молибдена и меди практически не изменяется по сечению образца, в то время, как основной легирующий элемент хром, показывает четкую систему гомогенизации по площади шлифа, что может повлечь за

собой повышение износостойкости и триботехнических свойств.

Для подтверждения результатов было проведено картирование образца по основным легирующим элементам, что в общем подтвердило ранее высказанные предположения (рис. 5), хотя эффект воздействия лазерного излучения на материал в данном случае наблюдается более наглядно. Далее для оценки воздействия лазерного излучения был проведен химический анализ по распределению элементов по поверхности шлифа при различных параметрах воздействия. На первом этапе был исследован образец с максимальным подводом энергии от оптоволоконного лазерного излучателя.

Для анализа его воздействия было выбрано 10 точек на обработанном образце. При выборе точек основной акцент делался на равномерность и ти-

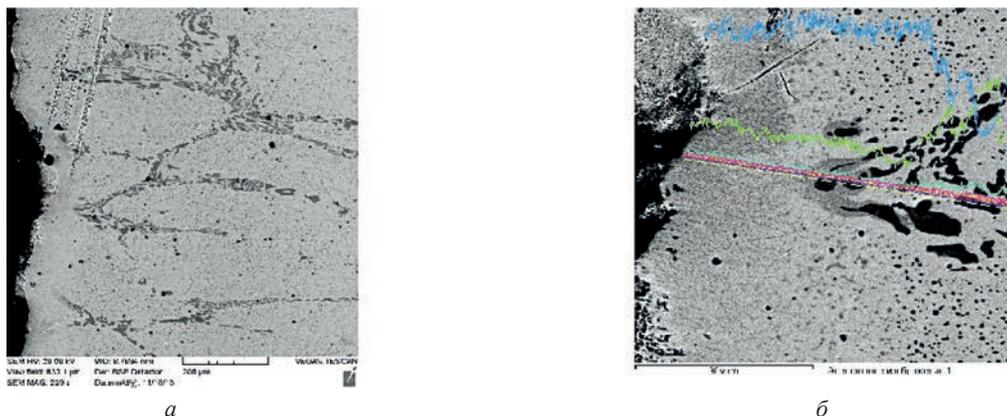


Рис. 6. Образец, обработанный CO<sub>2</sub>-лазером, при режиме  $d = 4$  мм,  $v = 1000$  мм/мин,  $P = 1,5$  кВт: *а* – общий вид; *б* – линия оценки распределения элементов

пичность структуры, присущей данной области образца. Выбранное количество пунктов измерения полностью соответствовало матрице и схеме измерений, проведенной на исходном материале.

По результатам анализа установлено значительное уменьшение хромсодержащей фазы до 18% (по среднему в связи с возможным его выгоранием), но, с другой стороны, видно проявление молибденовых пиков, что в соответствии с равномерным распределением хрома может повысить технологические свойства поверхности в 2 раза и более.

Для сравнения полученных результатов были проведены эксперименты на пониженной мощности ( $d = 4$  мм,  $v = 1000$  мм/мин,  $P = 1,4$  кВт) и произведены аналогичные исследования, которые показали, что, как и в первом случае, произошла гомогенизация хрома и ряда других элементов в зоне лазерного облучения. Однако необходимо отметить, что при этом наблюдалась неравномерность обработки поверхности и вспенивания материала основы. Данный аспект, возможно, объясняется резким испарением легкоплавких фаз или наличием в металле газосодержащих примесей. Так как данный эффект не является типичным для рассматриваемого материала, то для анализа распределения элементов он не рассматривался. При микроструктурном анализе было выявлено, что глубина воздействия лазерного излучения заметно ниже, чем в первом случае, и уступает ей порядка в 3–4 раза. Однако распределение элементов практически полностью повторяет первый режим обработки, что соответствует постулату о сходимости процессов, протекающих при однотипных режимах обработки и свидетельствует об одинаковом влиянии на материал основы. Необходимо отметить, что при анализе элементов по поверхности шлифа было выявлено, что молибденсодержащие фазы практически не присутствуют в данном образце,

что, по-видимому, можно объяснить неравномерным распределением элементов по сечению образца либо результатом каких-либо воздействий, произошедших при предварительном упрочнении (ковке).

Для удешевления обработки был использован широко распространенный CO<sub>2</sub>-лазер на режиме  $d = 4$  мм,  $v = 1000$  мм/мин,  $P = 1$  кВт. При его использовании было выявлено, что глубина структурных изменений ниже, чем при использовании оптоволоконного лазера, и составляет около 50–70 мкм (рис. 6). При этом внешний вид обработанной поверхности соответствует случаям, рассмотренным выше (рис. 6, *а*).

В качестве положительного момента данного типа обработки следует отметить, что она практически не вносит изменения в шероховатость поверхности (рис. 6, *а*), оставляя ее исходной шероховатости исходного образца. При этом, как и при обработке на оптоволоконном лазере, влияния термополей и напряжений на материал основы не наблюдалось, что оставляет за собой все ударопоглощающие свойства, характерные инструментальными сталями. Оценка изменений качества поверхности при CO<sub>2</sub>-обработке проводили по линии максимального нахождения хрома (рис. 6, *б*), так как изменение феррохромидов и карбидов хрома может привести к кардинальным изменениям свойств стали.

Рентгеноспектральный анализ образца, обработанного CO<sub>2</sub>-лазером, показал более высокую гомогенизацию по легирующим элементам, таким, как хром, марганец и ванадий (рис. 7), в отличие от оптоволоконного лазера, что, возможно, связано с большей активностью излучения в поверхностных слоях. По анализу распределения элементов было выявлено, что CO<sub>2</sub>-лазер хоть и не обладает высокой проникающей способностью, зато практически не изменяет исходный состав элемен-

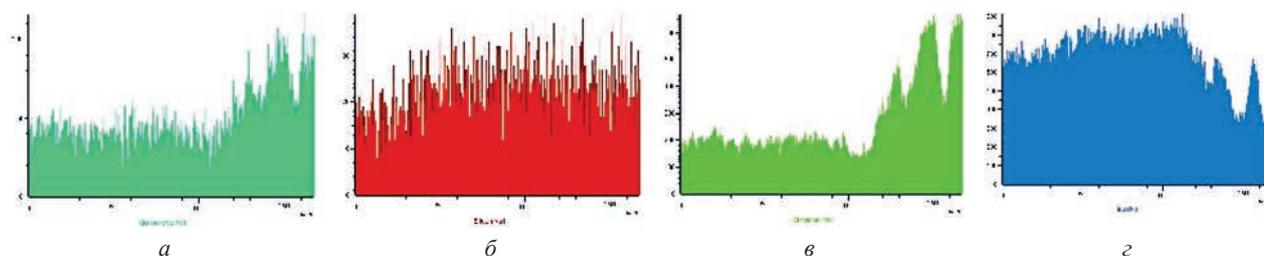


Рис. 7. Пики рентгеноспектрального анализа по основным элементам образца (см. рис. 6): *а* – марганец; *б* – кремний; *в* – хром; *г* – железо

тов, что было показано в предыдущем металлографическом анализе.

#### Выводы

В результате проведенных исследований необходимо отметить качественную составляющую обработки оптоволоконного лазера, который имеет наибольшую глубину проникновения и при ряде условий не оказывает серьезных изменений

на качество поверхности (отсутствие дополнительной шлифовки, полировки). Следует отметить и целесообразность использования CO<sub>2</sub>-лазера вследствие его дешевизны и распространенности на предприятиях Республики Беларусь, а также минимальные искажения поверхности и химического состава обрабатываемого образца, что ранее было указано в литературных источниках.

#### Литература

1. Григорьянц А. Г. Технологические процессы лазерной обработки / А. Г. Григорьянц, И. Н. Шиганов, А. И. Мисюров. М.: Изд-во МГУ им. Баумана, 2008.
2. Bach J., Damaschek R., Geissler E., Bergmann H. W. Laserumwandlungs härten von verschiedenen Stählen // HTM, 1991. Bd. 46. N 2. S. 97–107.
3. Кремнев Л. С., Холоднов Е. В., Владимирова О. В. Выбор сталей, подвергаемых лазерному упрочнению // Металловедение и термическая обработка металлов. 1987. № 9.
4. Бураков В. А., Бровер Г. И., Буракова Н. М. Повышение теплостойкости быстрорежущих сталей лазерным легированием // Металловедение и термическая обработка металлов. 1985. № 11.
5. Трегулов Н. Г., Соколов Б. К., Варбанов Г. А. и др. Лазерные технологии на машиностроительном заводе // Применение процессов лазерной обработки материалов. Уфа: ВНТО им. А. Н. Крылова, 1993.
6. Бровер А. В., Бровер Г. И., Дьяченко Л. Д. Некоторые особенности структурного состояния сталей в зонах лазерной обработки // Изв. вузов. Черная металлургия. 2007. № 6.
7. Вайнерман А. Е., Калганов Б. Д., Попов В. О. Особенности и перспективы создания и применения материалов с особыми свойствами поверхностных слоев // Вопросы материаловедения. 1996. № 1.
8. Попов В. Лазерное упрочнение сталей: сравнение волоконных и CO<sub>2</sub>-лазеров // Фотоника. 2009. № 4.