



УДК 621.7

Поступила 24.02.2014

В. А. КАЛИНИЧЕНКО, М. Л. КАЛИНИЧЕНКО, М. А. КАРДАПОЛОВА, П. В. ВЕРЕМЕЙ, БНТУ

АНАЛИЗ РЯДА СВОЙСТВ СТАЛИ Х12МФ ПОСЛЕ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Лазерная обработка позволяет концентрировать на поверхности материала высокий уровень энергии, и повышение поверхностной твердости может быть достигнуто получением равномерной мелкозернистой структуры с включениями карбидосодержащих фаз, равномерно распределенных в матрице. В настоящей работе был проведен анализ свойств стали Х12МФ после обработки различными лазерными установками и рекомендован ряд мероприятий для использования данной технологии.

Laser processing allows to concentrate high level of energy on material surface and the increase of surface hardness can be reached by receiving of uniform fine-grained structure with impurities of the carbide-containing phases uniformly distributed in matrix. Analysis of properties of H12MF steel after processing by various laser machines was carried out and a number of measures for use of this technology are recommended in the present article.

Введение

Известно [1–4], что лазерная обработка позволяет концентрировать на поверхности материала высокий уровень энергии, проводить нагрев и охлаждение с высокими скоростями, управлять свойствами поверхностного слоя в широких пределах без термообработки сердцевины и является экологически чистой технологией. В штамповых сталях, к которым относится Х12МФ, высокие прочностные свойства достигаются за счет карбидной составляющей, состоящей из сложных карбидов (Cr, Fe, V, M) С, которая является неоднородной. Повышение поверхностной твердости может быть достигнуто получением равномерной мелкозернистой структуры с включениями карбидосодержащих фаз, равномерно распределенных в железной матрице. В данной работе был проведен анализ ряда свойств стали Х12МФ после обработки различными типами лазеров.

Металлографический анализ

Штамповые стали, как и все виды упрочненных сталей, имеют высокую степень неоднородности, что позволяет им сочетать в себе свойства твердости и пластичности. В настоящий момент на ряде предприятий Республики Беларусь остро стоит вопрос упрочнения штамповых сталей, в особенности стали Х12МФ. Для планирования эксперимента по упрочнению данной стали и анализа ее физико-механических свойств был проведен спектральный анализ исходного материала по 10 точ-

кам на площади 150×150 мкм на участке с наиболее типичной микроструктурой (рис. 1).

По результатам анализа, выполненного с помощью «СПЕКТРОСКАН МАКС-GV» отмеченных выше 10 точек, было установлено процентное содержание элементов в различных структурных составляющих данного образца и проведен спектральный анализ основных элементов, приведенных в табл. 1.

Из таблицы видно, что распределение железа находится в диапазоне 44–90%, при этом хром распределяется в пределах 7–50 % в зависимости от его расположения, что доказывает полную неоднородность данного материала. Для гомогенизации структуры материал прошел дополнительную об-

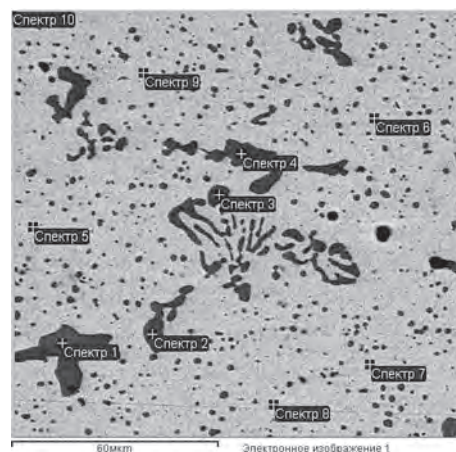


Рис. 1. Расположение точек для спектрального анализа по поверхности образца

Таблица 1. Анализ элементов по 10 точкам исходного образца, нормализован. Все результаты даны в вес. %

Спектр	Si	V	Cr	Fe	Ni	Cu	Mo	Итого
1	0,00	1,77	50,11	44,43	0,27	0,02	3,41	100,00
2	0,11	1,55	52,97	43,73	0,06	0,13	1,45	100,00
3	0,02	1,39	53,08	44,03	0,18	-0,08	1,38	100,00
4	-0,01	1,39	53,81	43,55	-0,02	-0,12	1,41	100,00
5	0,41	0,17	7,99	90,52	0,40	0,16	0,36	100,00
6	0,37	0,12	8,07	90,30	0,48	0,11	0,55	100,00
7	0,39	0,11	7,66	90,70	0,49	0,01	0,64	100,00
8	0,41	0,13	7,86	90,71	0,43	0,25	0,20	100,00
9	0,40	0,14	8,35	90,27	0,47	0,03	0,35	100,00
10	0,35	0,19	12,92	85,31	0,44	0,11	0,68	100,00
Среднее	0,24	0,69	26,28	71,36	0,32	0,06	1,04	100,00
Стандартное отклонение	0,19	0,72	22,63	23,66	0,19	0,11	0,96	
Максимальное	0,41	1,77	53,81	90,71	0,49	0,25	3,41	
Минимальное	-0,01	0,11	7,66	43,55	-0,02	-0,12	0,20	

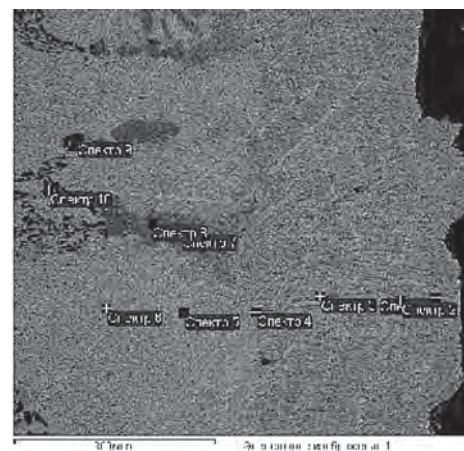
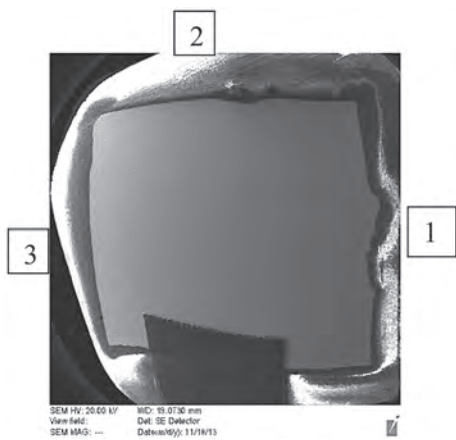


Рис. 2. Внешний вид образца после лазерной обработки: 1–3 – зоны с различными режимами обработки; 1 – воздействие оптоволоконным лазером при $d_{\text{пятна}} = 4$ мм, $v = 1100$ мм/мин, $P = 1,5$ кВт; 2 – $d_{\text{пятна}} = 4$ мм; $v = 1100$ мм/мин; $P = 1,4$ кВт; 3 – воздействие CO_2 -лазером при $d_{\text{пятна}} = 4$ мм, $v = 1000$ мм/мин

Рис. 3. Точки на образце, обработанном оптоволоконным лазером

работку с помощью высокоэнергетического воздействия оптоволоконным и CO_2 -лазерами. На рис. 2 показан экспериментальный образец после обработки, закрепленный в держателе электронного микроскопа. Для подтверждения эффекта гомогенизации поверхностного слоя по химическому составу в результате лазерной обработки по аналогии с исходным об-

разцом осуществлен спектральный анализ обработанного образца.

Как и в первом случае, были выбраны 10 точек по поверхности шлифа с таким учетом, чтобы они захватывали как гомогенизированную зону, так и переходную с частью основы (рис. 3). Результаты анализа приведены в табл. 2.

Таблица 2. Распределение элементов по 10 точкам обработанного образца

Спектр	Si	V	Cr	Fe	Ni	Cu	Mo	Итого
1	0,05	0,40	17,34	80,49	0,28	-0,02	1,46	100,00
2	0,10	0,13	8,91	90,17	0,25	0,13	0,30	100,00
3	0,09	0,12	10,08	88,99	0,20	0,11	0,41	100,00
4	0,16	0,08	9,83	89,00	0,40	0,03	0,49	100,00
5	0,33	0,16	9,01	89,77	0,38	0,05	0,29	100,00
6	0,33	0,09	7,92	90,86	0,41	0,04	0,35	100,00
7	0,22	0,59	23,69	74,42	0,29	-0,01	0,80	100,00
8	0,23	0,51	22,85	75,53	0,26	0,12	0,51	100,00
9	0,26	0,38	16,79	81,50	0,36	0,17	0,54	100,00
10	0,03	1,62	53,17	43,44	0,06	0,08	1,61	100,00
Среднее	0,18	0,41	17,96	80,42	0,29	0,07	0,68	100,00
Стандартное отклонение	0,11	0,47	13,70	14,41	0,11	0,06	0,48	
Максимальное	0,33	1,62	53,17	90,86	0,41	0,17	1,61	
Минимальное	0,03	0,08	7,92	43,44	0,06	-0,02	0,29	

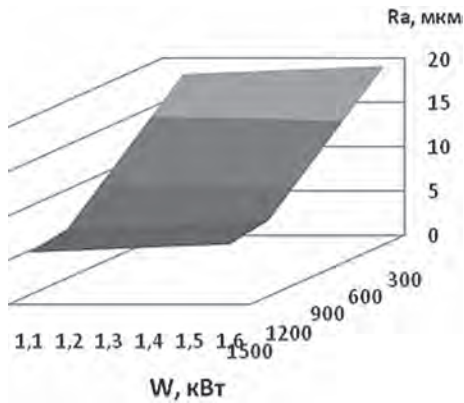


Рис. 4. Зависимость величины шероховатости при обработке оптоволоконным лазером с $d = 2$ мм от мощности

Анализ результатов спектрального анализа (табл. 2) позволяет зафиксировать значительное уменьшение содержания хрома в локальных участках до 8–10%, что возможно связано с растворением его в основной матрице или выгоранием, схожая картина наблюдается и с рядом других основных элементов.

Исследование физико-механических свойств

Одной из важнейших характеристик обработанной поверхности является шероховатость. Измерение шероховатости производили в соответствии с ГОСТ 27964-88[5] и ГОСТ 19300-86 [6]. Для оценки шероховатости поверхности исследовали такие параметры, как среднее арифметическое отклонение от профиля R_a , высоту максимального выступа R_p , максимальную высоту неровностей R_{max} , глубину максимальной впадины R_v и ряд других. В качестве прибора для проведения исследований и отображения необходимых параметров был выбран профилометр мод. 130. В результате были выявлены наиболее оптимальные параметры лазерного воздействия исходя из наименьшей шероховатости полученной поверхности. Учитывая исходную шероховатость образца, оптимальная шероховатость после лазерной обработки CO_2 -лазером получена при режимах: $d = 2$ мм, $v = 3000$ мм/мин; $d = 4$ мм, $v = 1000$ мм/мин, а оптимальная шероховатость для оптоволоконного лазера ЛС-2 получена

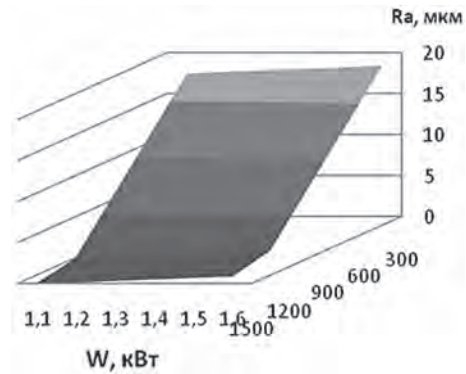


Рис. 5. Зависимость величины шероховатости при обработке оптоволоконным лазером с $d = 4$ мм от мощности

на при режимах: $d = 4$ мм, $v = 1000$ мм/мин, $P = 1,4$ кВт и $d = 4$ мм, $v = 1100$ мм/мин, $P = 1,5$ кВт. На основании полученных данных было решено обработать их аппроксиматорной программой на базе Microsoft Excel. В результате была рассмотрена зависимость диаметра пятна излучения для оптоволоконного лазера и его скорости на величину шероховатости стали (рис. 4, 5) и глубину упрочняемого слоя (рис. 6, 7).

Из рисунков видно, что их вид практически идентичен и в целом повторяет одну и ту же зависимость. Однако при расфокусировке лазера (увеличения пятна и, как следствие, снижении мощности на единицу поверхности) как положительный момент заметно снижение шероховатости, но в то же время как отрицательный момент наблюдается некоторое снижение толщины упрочненного слоя.

Для всех упрочненных материалов наиболее важными величинами являются твердость и микротвердость. Из-за небольшой толщины упрочненного слоя было принято решение взять в качестве исследуемого параметра величину микротвердости HV_{50} . Измерения проводили микротвердомером ПМТ-3 по стандартной методике при величине статической нагрузки 50 г. По результатам измерений была построена диаграмма (рис. 8), описывающая прочностные характеристики исследуемого материала.

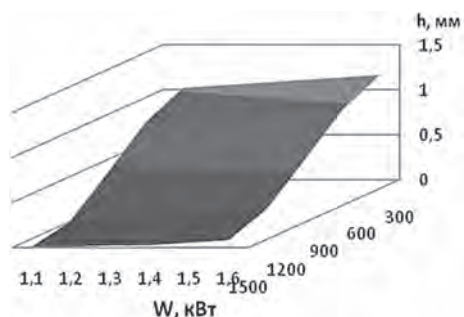


Рис. 6. Зависимость глубины упрочненного слоя при обработке оптоволоконным лазером с $d = 2$ мм от мощности

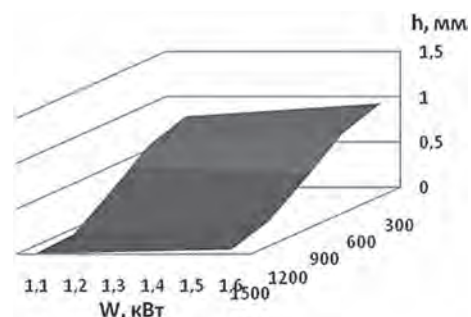


Рис. 7. Зависимость глубины упрочненного слоя при обработке оптоволоконным лазером с $d = 4$ мм от мощности



Рис. 8. Анализ микротвердости исходного образца и образцов после лазерного упрочнения

В связи с неоднородностью свойств исходного материала и для увеличения наглядности представленных данных исходный образец рассматривали в виде двух линий: верхняя граница твердости (карбиды и хромиды) и нижняя граница твердости (матрица). Усреднение данных не производили по причине высокой неоднородности структуры.

На верхние и нижние пределы твердости исходного образца были наложены графики изменения твердости после лазерного упрочнения. Из рис. 8 видно, что для всех типов упрочнения наблюдается одна и та же зависимость. Смещение пиков упрочнения связано с глубиной обработанного слоя. Как результат, при всех режимах обработки изначальная твердость заметно ниже максимальной твердости образца, что, возможно, связано с выгоранием легирующих элементов при ударном воздействии лазерного излучения. Далее следует дальнейшее снижение твердости образца, возможно связанное с отпускными процессами, после чего на всех образцах наблюдается высокий уровень упрочнения, что позволяет считать, что цель достигнута при условии шлифования поверхности, оптимальной для каждого из режимов.

Как видно из рисунка, при использовании оптоволоконного лазера на первом режиме (максимальная мощность) зона упрочнения начинается с расстояния от 0,5 мм от обработанной поверхности и имеет достаточно широкую зону около 1000 мкм.

В то же время необходимо отметить, что при меньшем количестве подводимой мощности оптоволоконный лазер ведет себя так же, как и CO_2 -лазер, однако глубина обрабатываемой поверхности у оптоволоконного лазера соответствует 200 мкм, у CO_2 -лазера – 100 мкм. При этом видно, что низкие мощности использования оптоволоконного лазера сравнимы с упрочняющим воздействием CO_2 -лазера, однако имеют пиковую дорожку на небольшом расстоянии (около 20–30 мкм), что не может являться технологическим упрочнением. В результате необходимо отметить, что при тех или иных условиях все виды лазерного излучения (в больших или меньших пределах) проводят упрочнение данного типа стали.

Выводы

Проведенные исследования показали, что достаточно сложно получить упрочненный высококачественный поверхностно-упрочненный слой после лазерной обработки по стандартным методикам. Поэтому после проплавления поверхности и получения гомогенного слоя глубиной 0,1–1,0 мм авторы могут рекомендовать для улучшения свойств материала либо полирование поверхности до зоны максимального упрочнения (в зависимости от требуемой точности изделия), либо проведение отпуска в зонах высокого проникновения лазерного упрочнения.

Литература

1. Григорьянц А. Г. Технологические процессы лазерной обработки / А. Г. Григорьянц, И. Н. Шиганов, А. И. Мисуров. М.: Изд-во МГУ им. Баумана, 2008.

2. A m e n d e W. Härten von Werkstoffen und Bauteilen des Maschinenbaus mit dem Hochleistungslaser, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1985.
3. К р е м н е в Л. С., Х о л о д н о в Е. В., В л а д и м и р о в а О. В. Выбор сталей, подвергаемых лазерному упрочнению // Металловедение и термическая обработка металлов. 1987. № 9.
4. П о п о в В. Лазерное упрочнение сталей: сравнение волоконных и CO₂-лазеров // Фотоника. 2009. № 4.
5. ГОСТ 27964-88. Измерение параметров шероховатости. Термины и определения.
6. ГОСТ 19300-86. Средства измерений шероховатости поверхности профильным методом. Профилографы-профилометры контактные.