



Научная статья

2.6.1 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические науки)

УДК536.425:539.25

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2022.4.2.002

 EDN: HAAUYB

ВЛИЯНИЕ ЛАЗЕРНОЙ МОДИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ И ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ШТАМПОВОЙ СТАЛИ

Дмитрий Игоревич Гаврилов¹, Алексей Валерьевич Жданов²,
Игорь Васильевич Беляев³

^{1,2,3} Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, Владимир, Россия

¹ tms@vlsu.ru

² zhdanov@vlsu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0158-8611>

³ belyaev-iv54@yandex.ru

Аннотация. В работе исследовали влияние лазерной модификации поверхности на величину коэффициента упругости, твёрдости, коэффициента трения и величину износа контртела при испытании изделий из инструментальной штамповой стали X12MФ. Для проведения лазерной обработки использовали лазерный комплекс СВАРОГ-1-5ДР (Россия). При задании различных режимов лазерной обработки варьировали мощность лазерного излучения, скорость перемещения лазерного луча относительно обрабатываемой поверхности и фокусное расстояние. Измерение показателей твёрдости по Виккерсу и износостойкости проводили при помощи установок Micro Combi Tester и Tribometer фирмы CSMIstruments (Швейцария). Твёрдость по Роквеллу измеряли при помощи твердомера TH 301 фирмы Time Group (Китай). Структуру сплава исследовали методами металлографии и рентгеновской дифрактометрии. Было установлено, что показатели твёрдости и износостойкости поверхностных слоёв стали X12MФ сильно зависят от режимов лазерной обработки. Зависимости эти носят экстремальный характер, имеют максимумы и минимумы. В работе приведены количественные значения показателей твёрдости и износостойкости до и после проведения лазерной обработки поверхности этой стали по различным режимам. Установлены причины изменения показателей твёрдости и износостойкости поверхностных слоёв стали X12MФ после лазерной обработки по различным режимам. Результаты работы использовали для оптимизации режимов лазерной обработки поверхности стали X12MФ с целью получения максимальных значений твёрдости и износостойкости. Показано, что лазерная обработка стали X12MФ без оплавления является перспективной с точки зрения повышения твёрдости и снижения трения. Получен режим лазерной модификации комплексе СВАРОГ-1-5ДР, позволяющий повысить твёрдость на 55,5 % при одновременном снижении коэффициента трения на 12,9 % и снижении износа на 27,3 %.

Ключевые слова: штамповая сталь, лазерная обработка, поверхностный слой, структура, твёрдость, износостойкость.

Благодарности: Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-03-2020-046/1 от 17.03.2020 г., тема FZUN-2020-0015, госзадание ВлГУ ГБ-1187/20) на оборудовании Центра коллективного пользования ВлГУ.

Для цитирования: Гаврилов Д. И., Жданов А. В., Беляев И. В. Влияние лазерной модификации поверхности на физико-механические и трибологические свойства штамповой стали // Ползуновский вестник. 2022. № 4. т. 2. С. 14–18. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2022.4.2.002. EDN: <https://elibrary.ru/HAAUYB>.

Original article

EFFECT OF LASER SURFACE MODIFICATION ON PHYSICO-MECHANICAL AND TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF STAMPED STEEL

Dmitriy I. Gavrilov¹, Alexey V. Zhdanov², Igor V. Belyaev³

^{1, 2, 3} Vladimir State University named after Stoletovsbrothes, Vladimir, Russia

¹ tms@vlsu.ru,

² zhdanov@vlsu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0158-8611>

³ belyaev-iv54@yandex.ru

Abstract. The effect of laser modification of the surface on the value of the coefficient of elasticity, hardness, coefficient of friction and the amount of wear of the counterbody when testing products made of tool die steel H12MF was investigated. The SVAROG-1-5DR laser complex (Russia) was used for laser processing. When setting different modes of laser processing, the power of laser radiation, the speed of movement of the laser beam relative to the treated surface and the focal length were varied. The measurement of Vickers hardness and wear resistance indicators was carried out using the MicroCombiTester and Tribometer units of the firm CSM Instruments (Switzerland). Rockwell hardness was measured using a TN 301 hardness tester from Time Group (China). The alloy structure was studied by metallography and X-ray diffractometry. It was found that the indicators of hardness and wear resistance of the surface layers of steel H12MF strongly depend on the laser treatment modes. These dependencies are extreme in nature, have maximums and minimums. The paper presents quantitative values of hardness and wear resistance indicators before and after laser treatment of the surface of this steel according to different modes. The reasons for the change in the hardness and wear resistance of the surface layers of steel H12MF after laser treatment according to various modes have been established. The results of the work were used to optimize the modes of laser surface treatment of steel H12MF in order to obtain maximum values of hardness and wear resistance. It has been shown that laser treatment of steel H12MF without melting is promising in terms of increasing hardness and reducing friction. The mode of laser modification of the SVAROG-1-5DR complex was obtained, which allows increasing the hardness by 55.5 % while reducing the coefficient of friction by 12.9 % and reducing wear by 27.3 %.

Keywords: stamped steel, laser treatment, surface layer, structure, hardness, wear resistance.

Acknowledgements: The research was carried out within the framework of the state task of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Agreement No. 075-03-2020-046/1 dated 17.03.2020, topic FZUN-2020-0015, state task of the VISU GB-1187/20) on the equipment of the VISU Collective Use Center.

For citation: Gavrilov, D. I., Zhdanov, A. V. & Belyaev, I. V. (2022). Effect of laser surface modification on physico-mechanical and tribological properties of stamped steel. *Polzunovskiy vestnik*, 4(2), 14-18. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2022.4.2.002. EDN: <https://elibrary.ru/HAAUYB>.

ВВЕДЕНИЕ

В процессе эксплуатации формообразующие детали вытяжных и вырубных штампов подвержены износу [1, 2], поэтому повышение физико-механических и трибологических свойств материалов этих деталей очень востребовано на практике [3–5]. Инструментальная штамповая сталь Х12МФ предназначена для изготовления штампов и других изделий с повышенной стойкостью к истиранию. Химический состав стали Х12МФ регламентирован ГОСТ 5950-2000, в соответствии с которым содержание основных элементов в стали должно

быть следующим, % мас.: С = 1,45...1,65; Si = 0,1...0,4; Mn = 0,15...0,45; Cr = 11...12,5; Mo = 0,4...0,6; V = 0,15...0,3; P = до 0,03; Fe-основа. Сталь Х12МФ поставляется потребителю после термической обработки, включающей закалку от 950–1000 °С в масле плюс отпуск при 180 °С в течение 1 часа. Микроструктура стали Х12МФ в состоянии поставки – мелкозернистый аустенит с карбидной неоднородностью 3–4 балла. При этом механические и эксплуатационные свойства сталей в состоянии поставки в большинстве случаев не соответствуют ужесточающимся условиям эксплуатации [6, 7].

К штамповым деталям (пуансонам и

матрицам) из стали Х12МФ предъявляют высокие требования к их твёрдости и износостойкости. Поэтому любые способы повышения твёрдости и износостойкости этих изделий являются актуальными. Одним из наиболее перспективных современных способов повышения твёрдости и износостойкости изделий из различных металлических материалов является лазерная обработка поверхности [8].

Данный метод реализуется при помощи различных лазерных установок, различающихся набором и уровнем технических характеристик. Обработка каждого конкретного материала на любой из этих установок требует нахождения оптимальных режимов, позволяющих получать максимальные (или заданные) значения твёрдости и износостойкости. Необходимо также установить причины изменения этих характеристик для данного обрабатываемого материала. В настоящее время отсутствуют достоверные сведения о режимах лазерной обработки поверхности изделий из стали Х12МФ, позволяющих регулировать показатели твёрдости и износостойкости с целью получения их оптимальных соотношений при помощи отечественной лазерной установки СВАРОГ-1-5ДР. Отсутствуют также сведения об изменениях в микроструктуре поверхностных слоёв стали Х12МФ, соответствующих максимальным значениям показателей твёрдости и износостойкости после лазерной обработки.

Цель настоящей работы – выявление режимов лазерной обработки поверхности стали Х12МФ, обеспечивающих максимальные значения твёрдости и износостойкости в условиях эксперимента.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалом для исследования являлась инструментальная штамповая сталь Х12МФ

Таблица 1 – Результаты измерения показателей твёрдости и износостойкости поверхностных слоёв стали Х12МФ до и после лазерной обработки по различным режимам

Table 1 – Results of measuring the hardness and wear resistance of the surface layers of steel Х12МФ before and after laser treatment according to various modes

№ п/п	Обозначение образца	Режимы л/о (W, кВт - V, мм/с - F, мм)	Твёрдость по Виккерсу, HV10, Н/мм ²	Коэффициент трения, м	Износ контрольного тела, мкм
1	4.1-БО	2-25-85	524	0,61	40
2	4.2-ОП	5-10-85	246	0,71	70
3	4.3-БО	5-25-60	509	0,78	53
4	4.4-ОП	2-10-85	327	0,74	50
5	4.5-БО	2-25-60	225	0,7	57
6	4.6-БО	2-10-60	198	0,59	56
7	4.7-ОП	5-10-60	331	0,46	30
8	4.8-ОП	5-25-85	329	0,72	50
9	Контрольный	Без л/о	233	0,7	55

Примечание. При обозначении образцов использовали следующие сокращения: л/о – лазерная обработка; БО – без оплавления обрабатываемой поверхности; ОП – с оплавлением обрабатываемой поверхности

по ГОСТ 5950-2000, из которой изготавливаются формообразующие детали штампов (рис. 1). Образцы для исследования нарезались в виде шайб из сортового проката размерами $\varnothing 50 \times 10$ мм.

Поверхности этих образцов подвергали лазерной обработке при различных значениях мощности лазерного излучения (W), скорости перемещения лазерного луча относительно обрабатываемой поверхности (V) и расстояния от источника лазерного излучения до обрабатываемой поверхности (фокусного расстояния, F).



Рисунок 1 – Фото формообразующей детали вырубного штампа из стали Х12МФ

Figure 1 – Photo of the forming part of the die-cutting die made of steel Х12МФ

Лазерную обработку поверхности исследуемых образцов проводили при помощи лазерного комплекса СВАРОГ-1-5ДР, оснащённого волоконным диодным лазером мощностью 5 кВт с длиной волны лазерного излучения от 780 нм (нижний предел) до 830 нм (верхний предел). Максимальная скорость перемещения по линейным осям 54 м/мин. Радиус рабочей зоны 3060 мм. Атмосферой при лазерной обработке являлся воздух. Режимы лазерной обработки приведены в таблице 1.

ВЛИЯНИЕ ЛАЗЕРНОЙ МОДИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ И ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ШТАМПОВОЙ СТАЛИ

В ходе эксперимента различали режимы лазерной обработки без оплавления поверхности (без ОП) и с оплавлением поверхности (с ОП). Измерения твёрдости проводили при помощи установки Micro-CombiTester фирмы CSMI Instruments (Швейцария) по методу Виккерса. Использовали алмазный индентор в форме четырёхгранной пирамиды с углом 136° и с радиусом при вершине 0,1 мм. Нагрузка при измерениях составляла 10 Н, время выдержки под нагрузкой – 10 сек.

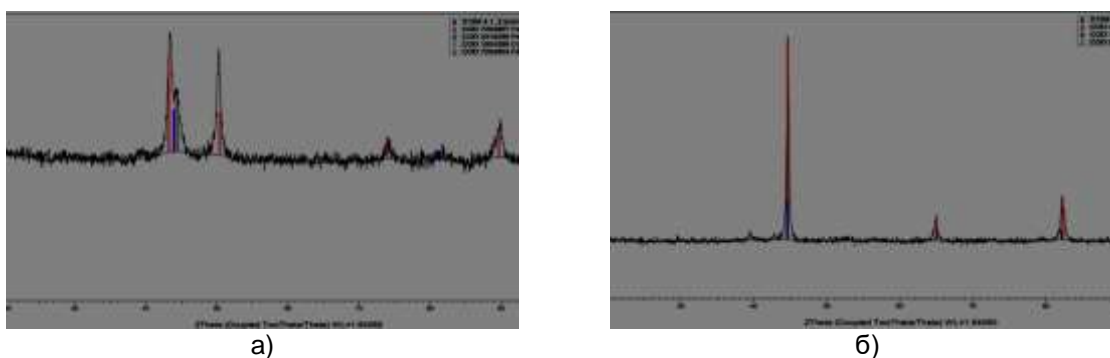
Дополнительно твёрдость измеряли при помощи твердомера ТН 301 фирмы Time-Group (Китай) по методу Роквелла. Нагрузка при измерении составляла 140 Н. Время выдержки под нагрузкой 10 с. Индентор представлял собой алмазный конус с углом $\alpha = 120^\circ$ и радиусом при вершине 0,2 мм. Для каждого образца проводили по три независимых измерения. Результаты усредняли.

Измерения износостойкости проводили при помощи установки Tribometer фирмы CSMI Instruments (Швейцария). В качестве контртела использовали шарики диаметром 6 мм из стали ШХ15СГ.

Фазовый состав поверхностных слоёв материала исследуемых образцов до и после лазерной обработки определяли при помощи рентгеновского дифрактометра D8 Advance фирмы Bruker AXS (Германия). Измерения проводили в излучении $\text{CuK}\alpha$.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Дифрактограммы образцов 1 и 2 после лазерной модификации без оплавления и с оплавлением показаны на рисунке 2. Результаты измерения показателей твёрдости и износостойкости исследуемых образцов до и после лазерной обработки приведены в таблице 1.



а) образец 1 (без оплавления), б) образец 2 с оплавлением

Рисунок 2 – Дифрактограммы образцов после лазерной модификации

Figure 2 – Diffractograms of samples after laser modification

ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ результатов таблицы показывает, что используемые режимы лазерной обработки в некоторых случаях вызывали оплавление обрабатываемой поверхности стали Х12МФ, в других случаях этого не происходило. Максимальные и минимальные значения твёрдости были получены на образцах, обработанных без оплавления поверхности. Минимальные и максимальные значения коэффициентов трения и величины износа – на образцах, обработанных с оплавлением обрабатываемой поверхности.

При лазерной обработке без оплавления поверхности максимальное значение твёрдости (524 НВ) получено на образце 4.1-БО, обработанному по режиму 1 (2-25-85). На этом же образце получено и минимальное значение износа (40 мм), хотя коэффициент трения здесь не был минимальным (0,61). Наименьшее значение

твёрдости (198 НВ) имел образец 4.6-БО, обработанный по режиму 6 (2-10-60), а наибольший износ (57 мм) – образец 4.5-БО, обработанный по режиму 5 (2-25-60) и имеющий коэффициент трения 0,7. Таким образом, наилучшее соотношение значений твёрдости и износа обеспечивает режим 1 (2-25-85). Режимы 5 и 6 являются неприемлемыми, поскольку приводят к получению значений твёрдости ниже, а значений износа выше, чем у контрольного образца.

При лазерной обработке с оплавлением поверхности максимальное значение твёрдости (331 НВ) имел образец 4.7-ОП, обработанный по режиму 7 (5-10-60). Этот же образец имел минимальное значение коэффициента трения (0,46) и минимальный износ (40мм). Минимальное значение твёрдости (246 НВ) и максимальный износ (70 мм) при значении коэффициента трения 0,71 имел образец 4.2-ОП, обработанный по режиму 2-10-85.

ВЫВОДЫ

Проведенные эксперименты показали следующее:

1. Лазерная обработка стали X12MФ без оплавления является перспективной с точки зрения повышения твердости и снижения трения. Получен режим лазерной модификации $W = 2$ кВт – $V = 25$ мм/с – $F = 85$ мм на лазерном комплексе СВАРОГ-1-5ДР, позволяющий повысить твердость на 55,5 % (с 233 до 524 НВ) при одновременном снижении коэффициента трения на 12,9 % (с 0,7 до 0,61) и снижении износа на 27,3 % (с 55 до 40 мкм)

2. Лазерная обработка стали X12MФ с оплавлением поверхности не приводит к сильному увеличению твердости обрабатываемой поверхности, но может значительно (в 1,8 раза) снизить значение износа (т. е. повысить её износостойкость). Данный результат получен при режиме обработки $W = 5$ кВт – $V = 10$ мм/с – $F = 60$ мм, что позволило снизить коэффициент трения с 0,7 до 0,46 (на 34,3 %), а износ с 55 до 30 мкм (на 45,5 %). Однако для штампов данный вид обработки, очевидно, не приемлем, поскольку нарушаются геометрические параметры прецизионных формообразующих частей, что делает невозможным работу штампа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Романовский, В.П. Справочник по холодной штамповке : справочник / В.П. Романовский. – Л. : Машиностроение, 1979. – 520 с.
2. Автоматизированное проектирование штампов : учеб. пособие ; под ред. В.В.Морозова / А.Г. Схиртладзе [и др.]. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2007. – 284 с.
3. Grabovskii, V.Y., Kanyuka, V.I. Austenitic Die Steels and Alloys for Hot Deformation of Metals // *Metal Science and Heat Treatment*. – 2001. – № 43. – P. 402–405.
4. Uglov, V.V. Tribological properties of ion-implanted high-chromium steel / [et al] // *Surface and Coatings Technology*. – 1994. – Vol. 66. – Iss. 1–3. – P. 283–287.
5. Balandin, Y.A. Boronitriding of Die Steels in Fluidized Bed / Y.A. Balandin // *Metal Science and Heat Treatment*. – 2004. – № 46. – P. 385–387.
6. Deev, V.B. Influence of melting unit type on the properties of middle-carbon cast steel / V.B. Deev // *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. – 2018. – Vol. 13. – Iss. 3. – P. 998–1001.
7. Hu, Z., Wang, K. Comparative Study on Thermal Fatigue Behavior of Two Hot Work Die Steels / Z. Hu, K. Wang // *Metallography, Microstructure and Analysis*. – 2022. – Vol. 11. – P. 425–433.
8. Усов, С.В. Промышленное применение физико-

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.*

Статья поступила в редакцию 10.10.2022; одобрена после рецензирования 30.11.2022; принята к публикации 15.12.2022.

The article was received by the editorial board on 10 Oct 2022; approved after editing on 30 Nov 2022; accepted for publication on 15 Dec 2022.

технических методов в производстве / С.В. Усов [и др.]. – Москва : Перо, 2021. – 283 с.

Информация об авторах

Д. И. Гаврилов – аспирант кафедры «Технологии машиностроения» Владимирского государственного университета им. А.Г. и Н.Г. Столетовых.

А. В. Жданов – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии машиностроения» Владимирского государственного университета им. А.Г. и Н.Г. Столетовых.

И. В. Беляев – доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии машиностроения» Владимирского государственного университета им. А.Г. и Н.Г. Столетовых.

REFERENCES

1. Romanovsky, V.P. (1979). Handbook of cold stamping: Handbook. L.: Mechanical Engineering. (In Russ.).
2. Skhirtladze, A.G. [et al.]. (2007). Automated design of stamps. textbook, edited by V.V. Morozov Vladimir : Publishing House of VISU, 284 p. (In Russ.).
3. Grabovskii, V.Y. & Kanyuka, V.I. (2001). Austenitic Die Steels and Alloys for Hot Deformation of Metals. *Metal Science and Heat Treatment*. (43). 402-405.
4. Uglov, V.V., Khodasevich, V.V., Cherenda, N.N., Kasho, I.V. & Kutsanov, V.A. (1994). Tribological properties of ion-implanted high-chromium steel. *Surface and Coatings Technology*. 66 (1-3). 283-287.
5. Balandin, Y.A. (2004). Boronitriding of Die Steels in Fluidized Bed. *Metal Science and Heat Treatment*. (46). 385-387.
6. Deev, V.B., Prusov, E.S., Vdovin, K.N., Bazlova, T.A. & Temlyantsev, M.V. (2018). Influence of melting unit type on the properties of middle-carbon cast steel. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 13(3). 998-1001.
7. Hu, Z. & Wang, K. (2022). Comparative Study on Thermal Fatigue Behavior of Two Hot Work Die Steels. *Metallography, Microstructure and Analysis*. (11). 425-433.
8. Usov, S.V. [et al.]. (2021). Industrial application of physical and technical methods in production. Moscow: Pero.

Information about the authors

D. I. Gavrilov - Postgraduate student of the Department of "Mechanical Engineering Technologies" of the Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs.

A. V. Zhdanov - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of "Machine Building Technologies" of the Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs.

I. V. Belyaev - Doctor of Technical Sciences Professor of the Department of "Machine-Building Technologies" of the Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs.