

УДК 620.22:539.216

ВЛИЯНИЕ ПОСТОЯННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ В СТАЛЯХ ПРИ СКОРОСТНОЙ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКЕ

Бровер А.В., к.т.н., доцент кафедры «Физическое и прикладное материаловедение» (brover@mail.ru)

Бровер Г.И., д.т.н., профессор кафедры «Физическое и прикладное материаловедение»

Донской государственный технический университет (ДГТУ)
(344002, Россия, Ростовская обл., Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1)

Аннотация. Экспериментальные исследования лазерно-облученных слоев в магнитном поле (МП) показали нетривиальную морфологию поверхности зоны обработки материалов в случае ее подплавления. Наблюдается закручивание тонкого слоя жидкого металла, зона облучения приобретает «серповидный» вид, ориентированный строго определенно относительно магнитного потока. Вероятно, это вызвано эффектом Риги-Ледюка, а также действием сил Лоренца, которые отклоняют направленный поток электронов. В результате наблюдается существенное перемешивание металла в зоне облучения, выравнивание химического состава, что положительно сказывается на прочностных свойствах готовых изделий. Одним из важных последствий влияния МП на результаты лазерной обработки является учет явления магнитострикции. При лазерном облучении без приложения МП на предварительно полированной поверхности образцов наблюдали линии скольжения, являющиеся следствием возникающих термических и структурных напряжений. Путем анализа рельефа облученной поверхности (с использованием современной методики анализа и компьютерной обработки изображений) установлено, что при облучении в МП в условиях магнитострикции уменьшается уровень напряжений в облученных зонах и снижается опасность трещинообразования. Результаты измерения температур по облученному пятну на стадии охлаждения позволили установить, что скорость охлаждения при лазерной обработке при использовании МП существенно выше, чем без его использования. Это накладывает отпечаток на протекающие процессы фазовых и структурных превращений. Сформировавшийся при лазерном нагреве в МП микронеоднородный аустенит с огромной скоростью переохлаждается до температур мартенситного превращения. Затем начинается его трансформация, последовательность которой определяется уровнем локального насыщения, степенью деформации и контролируется температурой. Первые кристаллы мартенсита образуются в наименее насыщенных участках аустенита, причем очень большая скорость (тысячи и десятки тысяч °C/c) начала процесса $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения предотвращает самоотпуск мартенсита, который частично может протекать при дальнейшем понижении температуры за счет распространения превращения на оставшийся объем аустенита, захватывая участки разной насыщенности. В результате наряду со «свежеобразованным» мартенситом в зонах лазерной закалки формируется мартенсит, в котором возможно образование сегрегаций углерода или даже ϵ -карбида, и остаточный аустенит с высокой насыщенностью по углероду. Выделяющиеся дисперсные карбиды способствуют получению достаточно высокой твердости облученного в МП металла.

Ключевые слова: лазерная обработка, магнитное поле, структурные и фазовые превращения, свойства облученных поверхностей.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-8-638-643

Среди разнообразных методов поверхностного упрочнения заметное место принадлежит импульсной лазерной обработке сталей и сплавов, которая позволяет создавать определенное структурное состояние и задавать свойства поверхностных слоев изделий в зависимости от требований условий эксплуатации.

Для реализации резервов термической обработки и с целью повышения свойств различных изделий рядом авторов проведены исследования возможности управления свойствами сталей путем специфической организации структуры за счет внешнего воздействия энергией постоянного магнитного поля (МП) в процессе фазовых превращений при термической обработке [1 – 6].

В настоящее время не все проблемы использования магнитного поля при термической обработке исследованы и решены, особенно это касается скоростной лазерной обработки. Требуется развития представления о механизме влияния магнитного поля на фазовые

и структурные превращения при экстремальном тепловом воздействии, а также на свойства сталей.

Для исследований использовали углеродистую сталь У8, легированную сталь Р6М5 и никель как модельный материал.

Металлофизические исследования проводили с использованием оптического микроскопа Neophot-21 и комплекса Nanoeducator в режиме атомно-силовой микроскопии.

Идентификацию фазового состава в зонах лазерного воздействия проводили методом дифракционного рентгеновского анализа. Исследования осуществляли на дифрактометре ДРОН-0,5 в фильтрованном Fe – K_{α} -излучении с регистрацией интенсивности сцинтилляционными счетчиками.

Импульсное лазерное облучение проводили на технологических установках «Квант-16» и «ГОС-30М». Изменения энергии излучения (10 – 30 Дж), степени дефокусировки луча (3 – 6 мм), длительности излу-

чения $(1 \div 6) \cdot 10^{-3}$ с позволили варьировать плотность мощности излучения в широких пределах.

Исследовали различные варианты лазерной обработки (с оплавлением и без оплавления поверхности) в постоянном магнитном поле напряженностью $\sim 0,7$ МА/м и проводили сравнение полученных результатов для аналогичных видов облучения без применения МП.

Регистрацию температур в зонах лазерной обработки сталей на стадии охлаждения осуществляли с использованием аппаратуры по методикам, изложенным в работах [7, 8].

Облучали образцы, расположенные в межполюсном зазоре электромагнита оригинальной конструкции (рис. 1).

Для исключения возможного влияния на результаты экспериментов электрического тока, проходящего через изделие, при проведении исследований образец изолировали от концентраторов МП тонким (примерно 0,12 мм) слоем асбестокартон. При облучении лазерный луч направляли на обрабатываемый материал перпендикулярно вектору магнитной индукции.

Замечены особенности распределения температур по облученному пятну на стадии охлаждения в случае лазерного облучения сталей в магнитном поле (рис. 2).

Как видно, при лазерном облучении с оплавлением поверхности в магнитном поле увеличиваются скорости охлаждения. Металлографический анализ таких

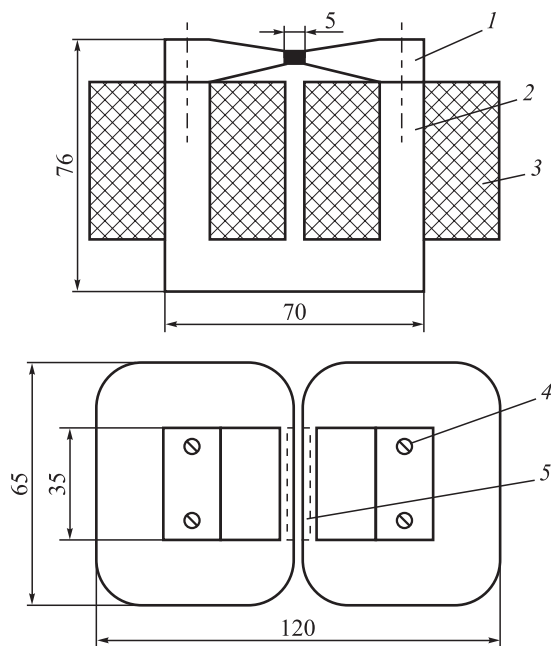


Рис. 1. Схема электромагнита с расположенным в нем образцом: 1 – съемные концентраторы МП; 2 – магнитопровод; 3 – катушки электромагнита; 4 – винты фиксации; 5 – образец

Fig. 1. Scheme of the original electromagnet with the sample located in it:

1 – removable concentrators of MF; 2 – magnet core; 3 – electromagnet coils; 4 – fixing screws; 5 – sample

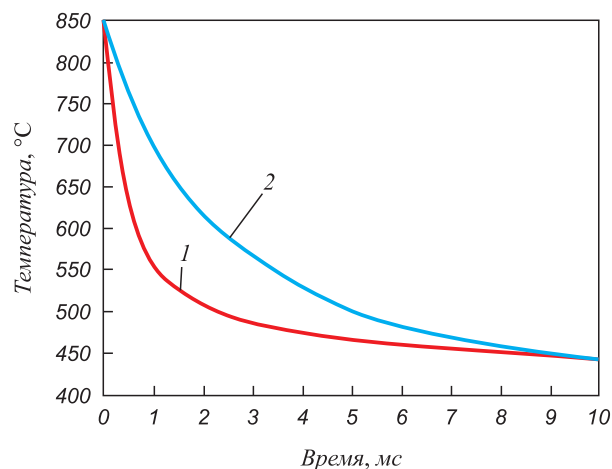


Рис. 2. Изменение температуры на стадии охлаждения после лазерного облучения стали У8 в магнитном поле (1) и без магнитного поля (2)

Fig. 2. Temperature change at cooling stage after laser irradiation of U8 steel in MF (1) and without MF (2)

образцов с использованием оптического микроскопа и сканирующего зондового микроскопа (рис. 3) выявил такие особенности поведения тонкого слоя жидкого металла на поверхности стали, как его закручивание и частичное удаление с обрабатываемой поверхности.

Во всех вариантах воздействия лазера на сталь в МП форма поверхности зоны облучения имеет неопределенную форму (в большинстве случаев «серповидную»), ориентированную строго определенно относительно магнитного потока. Наиболее вероятно, что это вызвано эффектом Риги–Ледюка, а также действием сил Лоренца, которые отклоняют направленный поток электронов. В результате уменьшается теплоотвод с поверхности в нижележащие слои металла, что незначительно уменьшает глубину лазерно-закаленного слоя, но при этом наблюдается существенное перемешивание металла в зоне облучения, выравнивание химического состава, что должно положительно сказаться на прочностных свойствах изделий [9].

При лазерном облучении без оплавления поверхности (как без применения МП, так и в МП) практически не заметна разница в распределении температур. Следствием является примерно одинаковая глубина упрочненного лазером слоя.

Одним из важных последствий влияния магнитного поля на результаты лазерной обработки является явление магнитоэлектрики. Следует отметить, что при лазерном облучении без магнитного поля на предварительно полированной поверхности образцов наблюдали линии скольжения, являющиеся следствием возникающих термических и структурных напряжений [10]. При облучении в МП в условиях магнитоэлектрики этот фактор практически себя не проявляет.

Подтверждением могут служить результаты исследования лазерно-обработанной поверхности никеля,

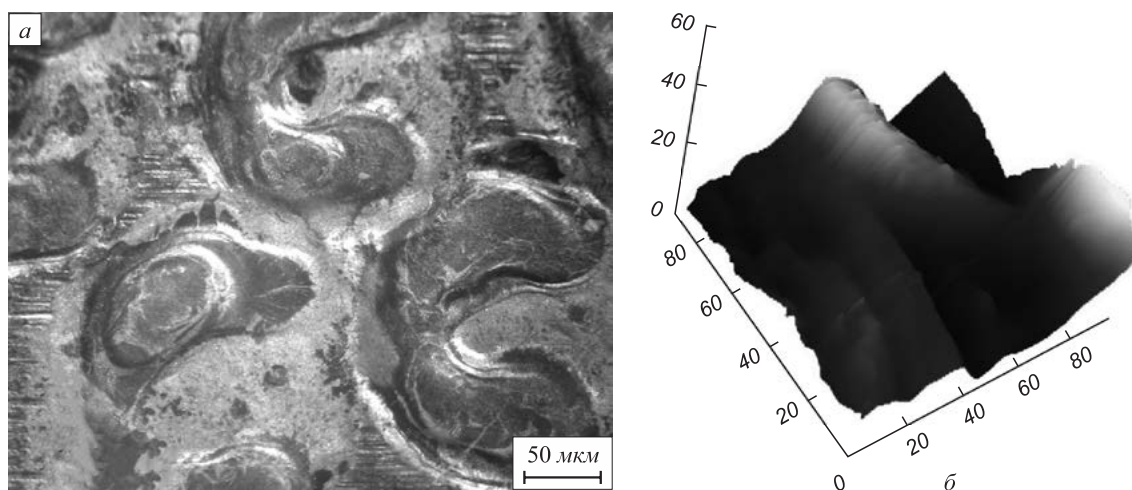


Рис. 3. Макроструктура участков стали У8, облученных в МП (а), и участок стали Р6М5 после лазерной обработки в МП (сканирующая зондовая микроскопия) (б)

Fig. 3. Macrostructure of U8 steel sections irradiated in MF (а) and R6M5 steel section after laser treatment in MF (scanning probe microscopy) (б)

являющегося пластичным материалом; и, следовательно, наиболее ярко проявляющим описанные эффекты. В частности, на рис. 4 приведены результаты анализа микрорельефа зоны облучения никелевых образцов в МП и без него. Статистические параметры морфологии поверхности определяли на заданном участке (отмечен на рис. 4, а) с использованием современной методики анализа и обработки изображений при помощи компьютерной программы Gwyddion.

Учитывая данные рис. 4, б, в установлено, что появление магнитострикции уменьшает степень локальной пластической деформации облученного металла, о чем свидетельствует уменьшение высоты линий скольжения до 6,5 нм в сравнении с 8,0 нм при обработке без магнитного поля. Можно сделать вывод, что наложение МП в процессе лазерной обработки уменьшает уровень напряжений в облученных зонах и снижает опасность трещинообразования.

С целью выяснения структурных особенностей процесса лазерной обработки сталей в магнитном поле проведены также рентгеноструктурные исследования, результаты которых приведены на рис. 5.

Прежде всего обращает на себя внимание факт присутствия на дифрактограммах рефлексов остаточного аустенита как при лазерной обработке без магнитного поля, так и в поле, хотя, как установлено в работах ряда авторов [11 – 15], магнитное поле должно инициировать образование мартенсита вследствие своеобразного расслоения аустенита, появления ферромагнитноупорядоченных кластеров и увеличения центров зарождения α -фазы.

Видимо, при скоростной лазерной закалке (особенно при наложении магнитного поля) эти эффекты слабо проявляются, что связано с чрезвычайно высокой скоростью охлаждения аустенита при подходе к точке M_n в интервале температур сверхпластичности

аустенита, что уменьшает вероятность образования в аустените устойчивых ферромагнитных кластеров, способствующих реализации мартенситного превращения [16 – 20]. Следует отметить, что интенсификация мартенситного превращения имеет место, если действуют небольшие по величине напряжения. В условиях лазерной обработки магнитострикционные напряжения суммируются с термическими и структурными, вследствие этого возможна релаксация напряжений, а следовательно, уменьшение степени $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения. К повышению устойчивости остаточного аустенита может привести и его упрочнение за счет незначительного (до b') поворота образовавшихся мартенситных кристаллов под действием магнитострикции.

Таким образом, картину структурных и фазовых превращений в поверхностных слоях сталей при лазерной обработке с наложением магнитного поля можно представить следующим образом: сформировавшийся при лазерном нагреве микронеднородный аустенит с огромной скоростью переохлаждается до температур мартенситного превращения. Затем начинается его трансформация, последовательность которой определяется уровнем локального насыщения, степенью деформации и контролируется температурой. Первые кристаллы мартенсита образуются в наименее насыщенных углеродом участках аустенита, причем очень большая скорость (тысячи и десятки тысяч $^{\circ}\text{C}/\text{с}$) начала процесса $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения предотвращает самоотпуск мартенсита, который частично может протекать при дальнейшем понижении температуры за счет распространения превращения на оставшийся объем аустенита, захватывая участки разной насыщенности. В результате наряду со «свежеобразованным» мартенситом в зонах лазерной закалки формируется мартенсит, в котором возможно образование сегрегаций

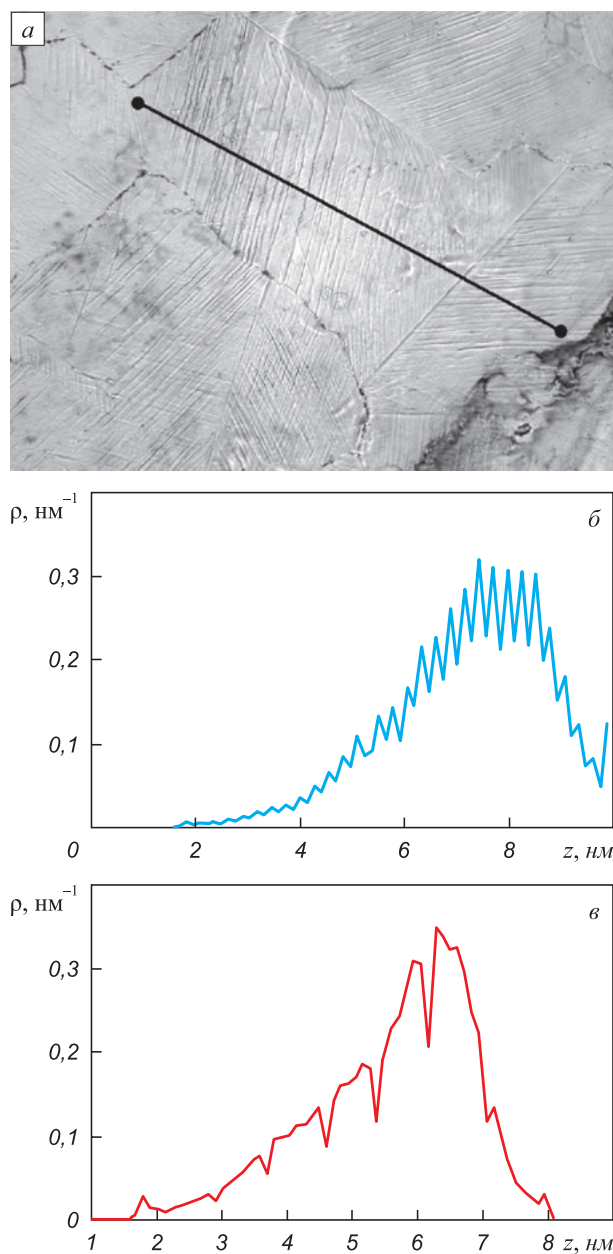


Рис. 4. Линии скольжения (а) и распределение их высот (в программе Gwyddion) на никеле после лазерной обработки без магнитного поля (б) и в магнитном поле (в)

Fig. 4. Slip lines (a) and their heights distribution (in Gwyddion software) in nickel after laser processing without MF (b) and in MF (c)

углерода или даже ϵ -карбида, и остаточный аустенит с высокой насыщенностью по углероду.

Подтверждением является экспериментально установленный эффект уменьшения скорости охлаждения поверхностных слоев облученных сталей при температурах ниже 400 °С. В случае наложения магнитного поля в этих условиях проявляется важное последствие влияния магнитострикционных напряжений, которые способствуют двухфазному распаду мартенсита. В результате рефлексы α -фазы (рис. 4) смещаются к большим углам отражения от $2\Theta = 111,766^\circ$ при облучения без магнитного поля до $2\Theta = 112,0389^\circ$ при облучении

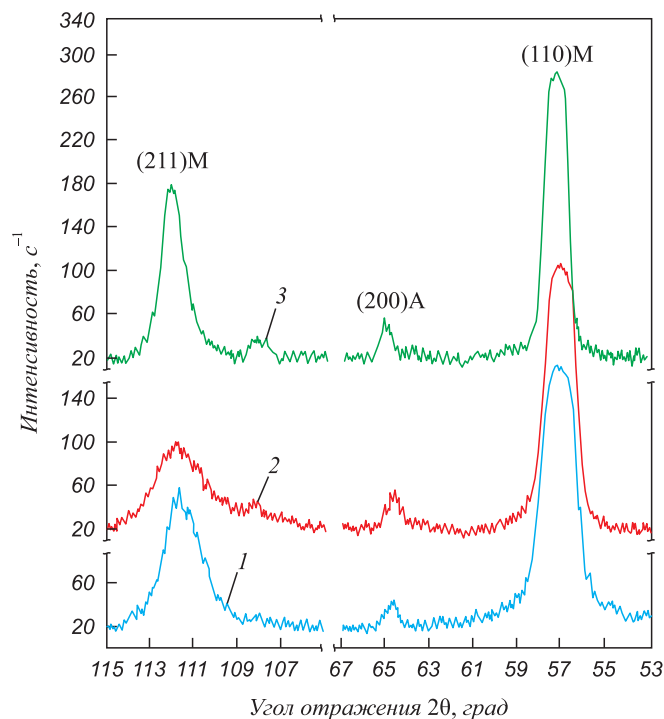


Рис. 5. Фрагменты рентгенограмм стали У8: 1 – объемная закалка; 2 – лазерная закалка без магнитного поля; 3 – лазерная закалка в магнитном поле

Fig. 5. Fragments of X-ray diffraction patterns of U8 steel: 1 – bulk hardening; 2 – laser hardening without MF; 3 – laser hardening in MF

в магнитном поле, что свидетельствует об уменьшении насыщенности мартенсита углеродом. Уменьшается уширение рефлексов от $b = 2,71491^\circ$ при облучении без поля до $b = 2,44949^\circ$ при облучении в поле, которое, как известно, характеризует присутствие неоднородных микроискажений и степень концентрационной неоднородности твердых растворов. Таким образом, при лазерной обработке сталей в магнитном поле протекают процессы частичного самоотпуска мартенсита. При этом уменьшаются уровень остаточных напряжений и опасность трещинообразования.

Выделяющиеся дисперсные карбиды способствуют получению достаточно высокой твердости облученного металла (на уровне 6 – 8 ГПа). Причем следует отметить более равномерное распределение твердости по глубине в случае облучения в магнитном поле и даже некоторое превышение твердости над твердостью лазерно-облученного металла без применения магнитного поля.

Поскольку при металлографических исследованиях увеличения глубины закаленного слоя при совмещении лазерного нагрева с магнитным полем не обнаружено, это, видимо, можно объяснить последствием действия магнитострикционных напряжений.

Выводы. Металлофизические эксперименты по лазерному облучению сталей в постоянном магнитном поле показали, что при этом повышается скорость

охлаждения металла, усиливается конвективное перемешивание зоны подплавления, уменьшается микрорельеф облученной поверхности, что приводит к повышению ее качества. Установлено, что лазерная обработка металла в МП уменьшает степень локальной пластической деформации облученного слоя за счет явления магнитострикции. Наложение магнитного поля способствует двухфазному распаду мартенсита лазерной закалки, следствием чего является уменьшение уровня остаточных напряжений и опасности трещинообразования в облученных зонах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бернштейн М.Л., Пустовойт В.Н. Термическая обработка стальных изделий в магнитном поле. – М.: Машиностроение, 1987. – 254 с.
2. Sadovskii V.D., Malinen P.A., Mel'nikov L.A. Influence of high pressure and a pulsed magnetic field on the martensite transformation in Fe-Ni and Fe-Ni-Mn alloys // *Met. Sci. Heat Treat.* 1972. Vol. 14. No. 9. P. 775 – 781.
3. Садовский В.Д., Смирнов Л.В., Романов Е.П. Влияние постоянного магнитного поля на диффузионный распад переохлажденного аустенита // *Физика металлов и металловедение.* 1978. Т. 46. № 2. С. 54, 55.
4. Joo H.D., Kim S.U., Shin N.S., Koo Y.M. An effect of high magnetic field on phase transformation in Fe-C system // *Materials Letters.* 2000. No. 43(5). P. 225 – 229.
5. Koch C.C. Experimental evidence for magnetic or electric field effects on phase transformations // *Materials Science and Engineering.* 2000. No. 287 (2). P. 213 – 218.
6. Joo H.D., Kim S.U., Koo Y.M., Shin N.S., Choi J.K. An effect of a strong magnetic field on the phase transformation in plain carbon steels // *Metallurgical and Materials Transactions.* 2004. Vol. 35 (6). P. 1663 – 1668.
7. Бровер А.В. Устройство бесконтактной регистрации температуры металла, изменяющейся с гипервысокой скоростью // *Упрочняющие технологии и покрытия.* 2007. № 3. С. 53 – 56.
8. Пат. на полезную модель 64363 РФ. Устройство для измерения температуры поверхности металла при воздействии концентрированным потоком энергии / В.Н. Пустовойт, А.В. Бровер, Л.Д. Дьяченко; заявл. 01.02.2007; опубл. 27.06.2007. Бюл. № 18.
9. Бровер А.В., Дьяченко Л.Д. Особенности структурообразования в зонах лазерного оплавления металлов и сплавов // *Металловедение и термическая обработка металлов.* 2009. № 6. С. 29 – 33.
10. Бровер А.В., Пустовойт В.Н. О локализованных напряжениях в лазерно-облученной поверхности металлических материалов // *Упрочняющие технологии и покрытия.* 2010. № 1. С. 3 – 7.
11. Müllner P., Chernenko V.A., Kostorz G. A microscopic approach to the magnetic-field-induced deformation of martensite (magneto-plasticity) // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials.* 2003. No. 267 (3). P. 325 – 334.
12. Kiefer Björn, Dimitris C. Lagoudas “Magnetic field-induced martensitic variant reorientation in magnetic shape memory alloys” // *Philosophical Magazine* 85. 2005. No. 33-35. P. 4289 – 4329.
13. Sadovskii V.D. Magnetic field and phase transformations in steel // *Met. Sci. Heat Treat.* 1966. No. 7. P. 441 – 445.
14. Kaletina Yu.V. Phase transformations in steels and alloys in magnetic field // *Met. Sci. Heat Treat.* 2008. No. 50. P. 413 – 416.
15. Schastlivtsev V.M., Kaletina Yu.V., Fokina E.A., Mirzaev D.A. Effect of External Actions and a Magnetic Field on Martensitic Transformation in Steels and Alloys // *Met. Sci. Heat Treat.* 2016. No. 58. P. 247 – 251.
16. Пустовойт В.Н., Долгачев Ю.В. Особенности структуры мартенсита, полученного при закалке стали в магнитном поле в температурном интервале сверхпластичности аустенита // *Металловедение и термическая обработка металлов.* 2011. № 11. С. 3 – 7.
17. Пустовойт В.Н., Долгачев Ю.В., Корнилов Ю.А. Неустойчивость кристаллической решетки перед мартенситным превращением и влияние внешнего магнитного поля в этих условиях // *Вестник Донского государственного технического университета.* 2009. Т. 9. № 2. С. 238 – 248.
18. Pustovoit V.N., Dolgachev Yu.V. Special features of the structure of martensite formed by hardening of steel in magnetic field in the temperature range of superplasticity of austenite // *Metal Science and Heat Treatment.* 2012. Vol. 53. No. 11-12. P. 515 – 519.
19. Pustovoit V.N., Dolgachev Y.V., Dombrovskii Y.M. Use of the Superplasticity Phenomenon of Steel for “Internal” Magnetic Correcting a Product // *Solid State Phenomena.* Trans Tech Publications. 2017. Vol. 265. P. 745 – 749.
20. Pustovoit V.N., Dolgachev Y.V. Ferromagnetically ordered clusters in austenite as the areas of martensite formation // *Emerging Materials Research.* 2017. Vol. 6. No. 2. P. 1 – 5.

Поступила 11 декабря 2017 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2018. VOL. 61. No. 8, pp. 638–643.

INFLUENCE OF CONSTANT MAGNETIC FIELD ON STRUCTURE FORMATION IN STEELS AT HIGH-SPEED LASER PROCESSING

A.V. Brover, G.I. Brover

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

Abstract. Experimental studies of laser-irradiated layers in a magnetic field (MF) have shown a non-trivial morphology of the surface of handling zone of material in case of reflow. Twisting of a thin layer of liquid metal is observed, irradiated area is getting a crescent appearance, definitely strictly oriented in relation to magnetic flux. This is probably due to the effect of Righi-Leduc, as well as the action of Lorentz forces, which deflect the electrons flow. As a result, there is significant mixing of metal in the irradiation zone, chemical composition equalization, which positively affects the strength properties of the products. One of the important consequences of the MF-effect on the results of laser processing is the phenomenon of magnetostriction. In laser irradiation without MF slide lines were observed on the

pre-polished surface patterns resulting from the emerging thermal and structural stresses. By analyzing the topography of irradiated surfaces using modern analysis techniques and computer image processing, it was established that irradiation in MF in conditions of magnetostriction decreases the stress level in irradiated areas and reduces the risk of cracking. The results of temperature measurements at the irradiated spot on cooling stage allow establishing that the cooling rate during laser processing in a MF is considerably higher than without the field. It affects the processes of phase and structural transformations. At laser heating in MF microheterogenic austenite is supercooled with great speed to temperatures of martensite transformation. After that its transformation begins, the sequence of which is determined by the level of local saturation, degree of deformation and is controlled by temperature. The first crystals of martensite are formed in the least saturated areas of austenite, and a very high speed (thousands or tens of thousands of °C/s) of the transformation process beginning $\gamma \rightarrow \alpha$

prevents martensite self tempering, which partially can occur when the temperature decreases further due to transformation spread on the remaining volume of austenite, grabbing areas of different saturation. As a result, along with the “fresh-formed” martensite in the areas of laser quenching the martensite is formed, in which segregation of carbon or even ϵ -carbide may occur and residual austenite with high carbon intensity are formed. Released dispersed carbides contribute to obtaining a sufficiently high hardness values of metals irradiated in a MF.

Keywords: laser processing, magnetic field, structural and phase transformations, irradiated surfaces properties.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-8-638-643

REFERENCES

- Bernshtein M.L., Pustovoi V.N. *Termicheskaya obrabotka stal'nykh izdelii v magnitnom pole* [Heat treatment of steel products in magnetic field]. Moscow: Mashinostroenie, 1987, 254 p. (In Russ.).
- Sadovskii V.D., Malinen P.A., Mel'nikov L.A. Influence of high pressure and a pulsed magnetic field on the martensite transformation in Fe–Ni and Fe–Ni–Mn alloys. *Metal Science and Heat Treatment*. 1972, vol. 14, no. 9, pp. 775–781.
- Sadovskii V.D., Smirnov L.V., Romanov E.P. Effect of constant magnetic field on the diffusion decay of supercooled austenite. *Fizika metallov i metallovedenie*. 1978, vol. 46, no. 2, pp. 54–55. (In Russ.).
- Joo H.D., Kim S.U., Shin N.S., Koo Y.M. An effect of high magnetic field on phase transformation in Fe–C system. *Materials Letters*. 2000, no. 43 (5), pp. 225–229.
- Koch C.C. Experimental evidence for magnetic or electric field effects on phase transformations. *Materials Science and Engineering*. 2000, no. 287 (2), pp. 213–218.
- Joo H.D., Kim S.U., Koo Y.M., Shin N.S., Choi J.K. An effect of a strong magnetic field on the phase transformation in plain carbon steels. *Metallurgical and Materials Transactions*. 2004, vol. 35 (6), pp. 1663–1668.
- Brover A.V. Device for contactless recording of metal temperature, changing with a hyper speed. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*. 2007, no. 3, pp. 53–56. (In Russ.).
- Pustovoi V.N., Brover A.V., D'yachenko L.D. *Ustroistvo dlya izmereniya temperatury poverkhnosti metalla pri vozdeistvii konsentrirovannym potokom energii* [Device for measuring temperature of metal surface exposed to concentrated flow of energy]. Utility model patent no. 64363 RF. *Byulleten' izobretenii*. 2007, no. 18. (In Russ.).
- Brover A.V., D'yachenko L.D. Structuring in metal and alloy laser melting zones. *Metal Science and Heat Treatment*. 2009, vol. 51, no. 5-6, pp. 292–296.
- Brover A.V., Pustovoi V.N. On localized stresses in laser-irradiated surface of metallic materials. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*. 2010, no. 1, pp. 3–7. (In Russ.).
- Müllner P., Chernenko V.A., Kistorz G. A microscopic approach to the magnetic-field-induced deformation of martensite (magneto-plasticity). *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2003, no. 267 (3), pp. 325–334.
- Kiefer Björn, Dimitris C. Lagoudas. Magnetic field-induced martensitic variant reorientation in magnetic shape memory alloys. *Philosophical Magazine* 85. 2005, no. 33-35, pp. 4289–4329.
- Sadovskii V.D. Magnetic field and phase transformations in steel. *Metal Science and Heat Treatment*. 1966, no. 7, pp. 441–445.
- Kaletina Yu.V. Phase transformations in steels and alloys in magnetic field. *Metal Science and Heat Treatment*. 2008, no. 50, pp. 413–416.
- Schastlivtsev V.M., Kaletina Yu.V., Fokina E.A., Mirzaev D.A. Effect of external actions and a magnetic field on martensitic transformation in steels and alloys. *Metal Science and Heat Treatment*. 2016, no. 58, pp. 247–251.
- Pustovoi V.N., Dolgachev Yu.V. Special features of the structure of martensite formed by hardening of steel in magnetic field in the temperature range of superplasticity of austenite. *Metal Science and Heat Treatment*. 2012, vol. 53, no. 11-12, pp. 515–519.
- Pustovoi V.N., Dolgachev Yu.V., Kornilov Yu.A. Instability of crystal lattice before the martensitic transformation and external magnetic field impact under these conditions. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2009, vol. 9, no. 2, pp. 238–248. (In Russ.).
- Pustovoi V.N., Dolgachev Yu.V. Special features of the structure of martensite formed by hardening of steel in magnetic field in the temperature range of superplasticity of austenite. *Metal Science and Heat Treatment*. 2012, vol. 53, no. 11-12, pp. 515–519.
- Pustovoi V.N., Dolgachev Yu.V., Dombrovskii Yu.M. Use of the superplasticity phenomenon of steel for “internal” magnetic correcting a product. *Solid State Phenomena. Trans. Tech. Publications*. 2017, vol. 265, pp. 745–749.
- Pustovoi V.N., Dolgachev Yu.V. Ferromagnetically ordered clusters in austenite as the areas of martensite formation. *Emerging Materials Research*. 2017, vol. 6, no. 2, pp. 1–5.

Information about the authors:

A.V. Brover, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Physical and Applied Material Science” (brover@mail.ru)

G.I. Brover, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Physical and Applied Material Science”

Received December 11, 2017