

УДК 669.15.018.295

DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.240418.52.267

ВЛИЯНИЕ ЛАЗЕРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОБРАЗОВАНИЕ ТРЕЩИН ВБЛИЗИ ВКЛЮЧЕНИЙ ПРИ ДЕФОРМАЦИИ В ИНТЕРВАЛЕ ТЕМПЕРАТУР 25...900 °С

ГУБЕНКО С. И.^{1*}, *д. т. н., проф.*,
НИКУЛЬЧЕНКО И. А.², *аспир.*

^{1*} Кафедра материаловедения, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (056) 374-83-57, e-mail: sigubenko@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-0002-0003

² Кафедра материаловедения, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (056) 374-83-57, ORCID ID: 0000-0011-0012-0013

Аннотация. *Цель исследования* – выявление влияния режима лазерного воздействия на механизм и параметры образования микроразрушений вдоль межфазных границ включение – матрица стали при разных скоростях деформации в интервале температур 25...900 °С. *Методика.* Материалами для исследований служили промышленные стали, содержащие различные неметаллические включения. Образцы различных сталей с предварительно полированной поверхностью подвергали лазерному облучению на установках ГОС-30М и КВАНТ-16 и деформации на установке ИМАШ. *Результаты.* Установлено влияние температурно-скоростного режима деформирования при разных скоростях деформации в интервале температур 25...900 °С, а также энергии лазерного импульса и длительности воздействия на параметры зарождения и развития хрупких расслоений. Показано, что в интервале температур 25...900 °С при разных скоростях деформации, чем выше температура деформации, тем больше величина критической степени деформации для всех видов включений и микроразрушений. *Научная новизна.* Установлено влияние скорости деформирования на величину критической степени деформации в интервале температур 25...900 °С, при достижении которой возникают микроразрушения вблизи включений после предварительной лазерной обработки. *Практическая значимость.* Полученные результаты помогут разработать режимы лазерной обработки, позволяющие использовать неметаллические включения как внутренние источники микролегирования, что позволит целенаправленно влиять на трещиностойкость сталей.

Ключевые слова: сталь; неметаллические включения; лазерное воздействие; трещины; деформация

ВПЛИВ ЛАЗЕРНОЇ ДІЇ НА УТВОРЕННЯ ТРІЩИН ПОБЛИЗУ ВКЛЮЧЕНЬ ЗА ДЕФОРМАЦІЇ В ІНТЕРВАЛІ ТЕМПЕРАТУР 25...900 °С

ГУБЕНКО С. І.^{1*}, *д. т. н., проф.*,
НИКУЛЬЧЕНКО І. О.², *аспир.*

^{1*} Кафедра металознавства, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 374-83-57, e-mail: sigubenko@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-0002-0003

² Кафедра металознавства, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 374-83-57, ORCID ID: 0000-0011-0012-0013

Анотація. *Мета дослідження* – виявлення впливу режиму лазерної дії на механізм і параметри утворення мікроруйнувань уздовж міжфазних меж включення – матриця сталі за різних швидкостей деформації в інтервалі температур 25...900 °С. *Методика.* Матеріалами для досліджень стали промислові сталі, які містять різні неметалеві включення. Зразки різних сталей з попередньо полірованою поверхнею піддавали лазерному опроміненню на установках ГОС-30М і КВАНТ-16, і деформації на установці ИМАШ. *Результати.* Встановлено вплив температурно-швидкісного режиму деформування за різних швидкостей деформації в інтервалі температур 25...900 °С, а також енергії лазерного імпульсу і тривалості впливу на параметри зародження і розвитку крихких розшарувань. Показано, що в інтервалі температур 25...900 °С за різних швидкостей деформації, чим вища температура деформації, тим більша величина критичного ступеня деформації для всіх видів включень і мікроруйнувань. *Наукова новизна.* Встановлено вплив швидкості деформування на величину критичного ступеня деформації в інтервалі температур 25...900 °С, за досягнення якої виникають мікроруйнування поблизу включень після попередньої лазерної обробки. *Практична значимість.* Отримані результати допоможуть розробити режими лазерної обробки, які дозволять використовувати неметалеві включення як внутрішні джерела мікрولةгування, що сприятиме цілеспрямованому впливу на тріщиностійкість сталей.

Ключові слова: сталь; неметалеві включення; лазерна дія; тріщини; деформація

EFFECT OF THE LASER EXPOSURE TO THE FORMATION OF CRACKLES NEAR TO INCLUSIONS IN THE DEFORMATION AT THE INTERVAL OF TEMPERATURES 25...900 °C

GUBENKO S.I.^{1*}, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
NIKULCHENKO I.O.², *Postgraduate Student*

^{1*} Material Science Department, National Metallurgical Academy of Ukraine, Gagarina ave., 4, 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 374-83-57, e-mail: sigubenko@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-0002-0003

² Material Science Department, National Metallurgical Academy of Ukraine, Gagarina ave., 4, 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 374-83-57, ORCID ID: 0000-0011-0012-0013

Abstract. Purpose of the research. The aim of the work is to identify the effect of laser irradiation on the mechanism and parameters of the formation of microcracks along the inclusion – matrix steel boundaries at different strain rates in the temperature range 25...900 °C. **Methodology.** Materials for research were industrial steels containing various non-metallic inclusions. Samples of various steels with a pre-polished surface were subjected to laser irradiation at the GOS-30M and KVANT-16 installations, and deformations at the IMASH installation. **Results.** The influence of the temperature-rate deformation mode at different strain rates in the temperature range 25...900 °C, as well as the laser pulse energy and the duration of the impact on the parameters of nucleation and development of brittle bundles has been established. It is shown that in the temperature range 25...900 °C with different strain rates the higher the temperature of deformation, the greater the magnitude of the critical degree of deformation for all types of inclusions and microdamages. **Scientific novelty.** The influence of the deformation rate on the value of the critical degree of deformation in the temperature interval of 25...900 °C, upon reaching which micro-destructions occur near the inclusions after preliminary laser treatment, was established. **Practical significance.** The using of receiving results will allow to elaborate the regimes of laser treatment allowing to use the non-metallic inclusions as inner sources of micro-alloying that will allow to directly influence on the level of crack resistance of steels.

Keywords: steel; non-metallic inclusions; laser action; cracks; deformation

Введение

Установлено, что предварительное лазерное воздействие оказывает влияние на поведение неметаллических включений при пластической деформации [1]. Целью работы является выявление влияния режима лазерного воздействия на механизм и параметры образования микроразрушений вдоль межфазных границ включение – матрица стали при разных скоростях деформации в интервале температур 25...900 °C.

Материалы и методики исследований

Образцы сталей R7, НБ-57, 08кп, 08Х, 08Т, 08Ю, ШХ15 с полированной поверхностью подвергали лазерному воздействию на установке ГОС-30М при энергии импульса 10...30 Дж. Скорость нагрева составляла 10⁵ °C/с, время действия импульса – (1,0...6,0) 10⁻³ с, скорость охлаждения – 10⁶ °C/с. При исследовании образования трещин образцы сталей подвергали растяжению в вакууме при температурах 25...900 °C на установках Инстрон-1195 и ИМАШ-5С со скоростями перемещения захватов V1-800, V2-1680 и V3 2000 мм/мин. Исследования проводили с помощью оптического прибора «Neophot-21».

Результаты исследований и их обсуждение

Как было показано в работах [1–5], вблизи всех видов неметаллических включений после растяжения при различных температурах происходит локализация деформации, приводящая к возникновению микроразрушений. Для многих включений при обычном растяжении характерно

образование полостей (вязких трещин) путем расслоения вдоль межфазных границ включение – матрица, поэтому представляет интерес изучить влияние лазерного упрочнения границ включение – матрица на характер и условия образования трещин при разных температурно-скоростных режимах деформации.

Как было показано в работе [1], лазерная обработка способствует изменению механизма образования трещин вблизи включений при последующей деформации, а именно, вблизи включений, склонных к образованию полостей (вязких трещин) путем декогезии межфазных границ включение – матрица, образуются хрупкие расслоения (хрупкие трещины) вдоль указанных границ. В то же время не изучено совместное влияние температуры и скорости деформации на образование микроразрушений вблизи включений, а также влияние градиентных и композитных зон в стальной матрице на развитие трещин.

В настоящем исследовании у включений оксидов Al₂O₃, Cr₂O₃, MnO·Al₂O₃, MgO·Al₂O₃, MnO, MnO·Cr₂O₃, сульфидов, сульфидных эвтектик FeS–FeO, (Fe,Mn)S–FeS, (Fe,Cr,Mn)S–FeS и силикатных эвтектик, не находящихся в зоне облучения, появились полости, что подтверждает данные, полученные в работах [1–5]. В то же время ни у одного включения в пределах пятен облучения полостей не было. Наблюдалась ярко выраженная локализация деформации (рис. 1 а) при степенях деформации до 10...15 %. Повышение степени деформации выше 10...15 % в зависимости от типа стали приводило к образованию вдоль межфазных границ тонких расслоений, представляющих собой

хрупкие трещины (рис. 1 б-г). Они появлялись в зоне лазерного воздействия у включений корунда, шпинелей, сульфидов и силикатов, имеющих неправильную и часто угловатую форму и крупные размеры (выше 30 мкм). Вблизи оксидов титана хрупкие расслоения вдоль межфазных границ с матрицей практически не встречались. Включения

всех типов, размеры которых превышали 20...30 мкм, иногда хрупко разрушались. Следует учитывать влияние неоднородности температурного поля в зоне теплового лазерного воздействия на характер упрочнения границ включение – матрица и локального упрочнения стальной матрицы вблизи включений [6–9].

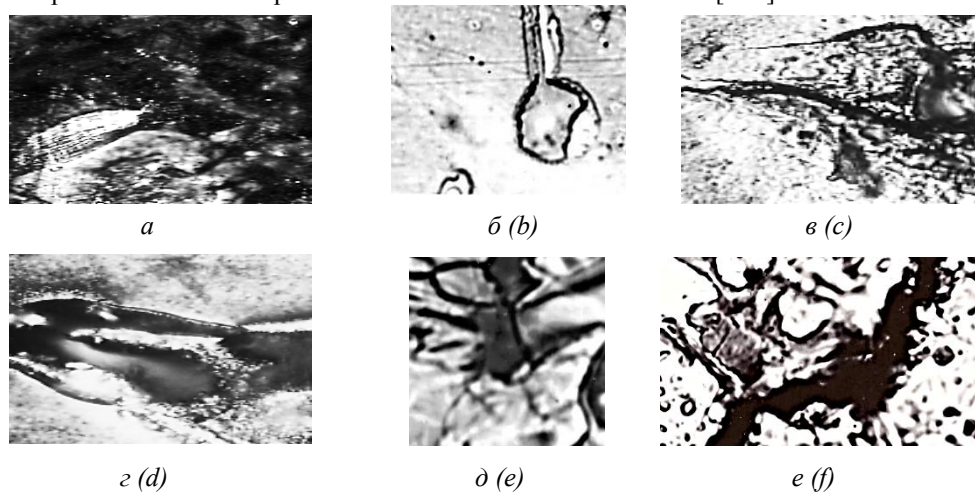


Рис. 1. Включения после лазерного воздействия и деформации:
 а, б – $MnO \cdot Al_2O_3$ в стали 08Ю; в – $FeS-(Fe, Mn)S$ в стали М68 (НБ-57); г – $MnO \cdot SiO_2$ в стали 12ГС;
 д – $MnO \cdot Al_2O_3$ в стали R7; е – $FeS-(Fe, Mn)S$ в стали R7; $\times 500$ /
 Fig. 1. The inclusions after laser irradiation and deformation:
 а, b – $MnO \cdot Al_2O_3$ in steel 08Ю; c – $FeS-(Fe, Mn) S$ in steel M68 (НБ-57); d – $MnO \cdot SiO_2$ in 12ГС steel;
 e – $MnO \cdot Al_2O_3$ in steel R7; f – $FeS-(Fe, Mn)S$ in steel R7; $\times 500$

Следует разделить интервалы температур деформации, когда влияние изменения пластичности стальной матрицы определяет параметры образования микроразрушений вблизи включений без протекания проскальзывания вдоль границ включение – матрица (25...900 °С) и при реализации этого процесса (1 000...1 250 °С) [1; 10].

В таблице приведены значения критических степеней деформации для интервала температур деформации 25...900 °С при разных скоростях деформации. Очевидно, чем выше температура деформации, тем больше величина критической степени деформации $\epsilon_{кр}$ для всех видов включений и микроразрушений.

Таблица

Величины критической степени деформации $\epsilon_{кр}$, %, при достижении которой возникают микроразрушения вблизи включений в колесной стали R7 при разных скоростях деформирования (V_1 (800 мм/мин), V_2 (1 680 мм/мин), V_3 (2 000 мм/мин)) без ЛТО и после ЛТО по режиму $W_{имп} = 25$ Дж, $\tau_{имп} = 3,6 \cdot 10^{-3}$ с / The values of the critical degree of deformation ϵ_{cr} , % for reaching it there are microfractures near inclusions in the R7 steel at different deformation rates (V_1 (800 mm/min), V_2 (1 680 mm/min), V_3 (2 000 mm/min)) without LTO and after LTO according to the regime $W_{имп} = 25$ J, $\tau_{имп} = 3,6 \cdot 10^{-3}$ sec

Включение, дефект	Температура деформации, °С								
	25			600			900		
	V_1	V_2	V_3	V_1	V_2	V_3	V_1	V_2	V_3
<i>l</i>	2			3			4		
Al_2O_3 , $MnO \cdot Al_2O_3$ полости без ЛТО	4	4	2	8	9	2	15	14	10
(Fe, Mn)S полости без ЛТО	10	12	6	15	16	8	20	20	13
(Fe, MnO)·SiO ₂ трещины во включении без ЛТО	2	2	1	2	3	1	7	7	4
Al_2O_3 , $MnO \cdot Al_2O_3$ хрупкие расслоения на границах включение – матрица после ЛТО	11	12	6	12	15	8	19	20	14

Окончание таблицы									
1	2			3			4		
(Fe, Mn)S хрупкие расслоения на границах включения – матрица после ЛТО	15	16	11	21	22	17	27	27	22
(Fe, MnO)·SiO ₂ , трещины во включениях после ЛТО	5	5	3	8	8	5	14	16	12

Проявилось влияние скорости деформации (скорости перемещения захватов $V_1 - 800$ мм/мин, $V_2 - 1\ 680$ мм/мин, $V_3 - 2\ 000$ мм/мин) в интервале температур $25...900$ °С на величину $\epsilon_{кр}$, при достижении которой возникают микроразрушения вблизи включений при деформации без предварительного лазерного воздействия (табл. 1), что согласуется с результатами, приведенными в работах [1–5].

На величину $\epsilon_{кр}$ влияет также режим предварительного лазерного воздействия. Анализ результатов исследований показал, что значения $\epsilon_{кр}$

возрастают при всех режимах лазерного воздействия, однако минимально повышаются при граничных значениях энергии лазерного импульса, и в большей степени – при $W_{имп} 18...25$ Дж, что указывает на наличие интервала энергий импульсного лазерного воздействия, позволяющего получать максимальное лазерное упрочнение стальной матрицы, в том числе вблизи включений (табл. 2). Влияние времени предварительного лазерного воздействия проявляется в том, что с его увеличением величина $\epsilon_{кр}$ возрастает благодаря более эффективному лазерному упрочнению стальной матрицы.

Таблица 2

Величина критической степени деформации $\epsilon_{кр}$, % для разных типов включений в стали 08Ю при температуре 600 °С и разных режимах предварительной лазерной обработки (для V_2) / The magnitude of the critical degree of deformation $\epsilon_{кр}$, % for different types of inclusions in steel 08U at the temperature of 600 °С and different pre-laser treatment modes (for V_2)

$W_{имп}$, Дж	$\tau_{имп} \cdot 10^{-3}$, с	Al ₂ O ₃ , MnO·Al ₂ O ₃	(Fe, Mn)S
10	1,0	6	10
	3,6	7	14
18	1,0	12	16
	3,6	14	18
25	1,0	12	17
	3,6	15	22
30	1,0	10	15
	3,6	12	19

Выводы

Установлено влияние температурно-скоростного режима деформирования при разных скоростях деформации в интервале температур $25...900$ °С, а

также энергии лазерного импульса и длительности воздействия на параметры зарождения и развития хрупких расслоений.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Неметаллические включения в стали: монография / [С. И. Губенко, С. П. Ошкадеров]. – Киев : Наукова думка, 2016. – 528 с.
2. Неметаллические включения и усталость стали : монография / [А. Б. Куслицкий]. – Киев : Техника, 1976. – 128 с.
3. Губенко С. И. К вопросу о природе красноточности стали / С. И. Губенко, А. М. Галкин // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 1984. – № 10. – С. 11–15.
4. Бельченко Г. И. Микронеоднородная деформация стали, содержащей неметаллические включения / Г. И. Бельченко, С. И. Губенко // *Известия АН СССР. Металлы*. – 1981. – № 4. – С. 94–97.
5. Gubenko S. Influence of Nonmetallic Inclusions on Microbreaks Formation in Wheel Steel and Railway Wheels / S. Gubenko, Yu. Proidak, A. Kozlovsky, A. Shramko, M. Iskov // *Materials of VIII-th Scientific Conference “Telematics, Logistics and Transport Safety” TLTS’08*. – Poland, Katowice–Cieszyn. – 2008. – Pp. 14–19.
6. Упрочнение деталей лучом лазера : монография / [В. С. Коваленко, Л. Ф. Головкин, Г. В. Меркулов, А. И. Стрижак]. – Киев : Техника, 1981. – 131 с.
7. Лазерная поверхностная обработка металлов и сплавов : монография / [П. А. Леонтьев, Н. Т. Чеканов, М. Г. Хан]. – Москва : Металлургия, 1986. – 142 с.
8. Лазерная и электроннолучевая обработка материалов : справочник / [Н. Н. Рыкалин, А. А. Углов, И. В. Зуев, А. Н. Кокора]. – Москва : Машиностроение, 1985. – 496 с.
9. Денисенко О. І. Розподіл температури одновимірного зразка в умовах місцевої термообробки / О. І. Денисенко, В. І. Цоцко, І. М. Спиридонова, Б. Г. Пелешенко // *Фізика і хімія твердого тіла*. – Т. 9. – № 1 (2008). – С. 181–184.
10. Губенко С. И. Возможности трансформации неметаллических включений и межфазных границ включения – матрица при высокоэнергетических обработках / *Металлофизика, новейшие технологии*. – 2014. – Т. 36. – № 3. – С. 287–315.

REFERENCES

1. Gubenko S.I. and Oshkadev S.P. *Nemetallicheskie vkluchenija v stali* [Non-metallic inclusions in steel]. Kyiv : Naukova dumka Publ., 2016, 528 p. (in Russian).
2. Kuslitskij A.B. *Nemetallicheskie vkluchenija i ustalost stali* [Non-metallic inclusions and fatigue of steel]. Kyiv : Technics Publ., 1976, 128 p. (in Russian).
3. Gubenko S.I. and Galkin A.M. *K voprosu o prirode krasnolomkosti stali* [On the nature of steel brittleness]. *Metallovedenie i termicheskaja obrabotka metallov* [Metal Science and Heat Treatment of Metals], 1984, no. 10, pp. 11–15 (in Russian).
4. Belchenko G.I. and Gubenko S.I. *Microneodnorodnaja deformatsia stali, sodержashchei nemetallichskie vkluchenia* [Microheterogeneous deformation of steel containing non-metallic inclusions]. *Izvestija AN SSSR. Metalli* [News of the USSR Academy of Sciences. Metals]. 1981, no. 4, pp. 94–97. (in Russian).
5. Gubenko S., Proidak Yu., Kozlovsky A., Shramko A. and Iskov M. Influence of Nonmetallic Inclusions on Microbreaks Formation in Wheel Steel and Railway Wheels. Materials of VIIIth Scientific Conference “Telematics, Logistics and Transport Safety” TLTS’08, Poland, Katowice–Cieszyn, 2008, pp. 14–19.
6. Kovalenko V.S., Golovko L.F., Merkulov G.V. and Strizhak A.I. *Uprochnenie detalij luchom lazera* [Strengthening of parts with laser beam]. Kyiv: Technics Publ., 1981, 131 p. (in Russian).
7. Leontjev P.A., Chekanov N.T. and Han M.G. *Lazernaja poverhnostnaja obrabotka metallov i splavov* [Laser surface treatment of metals and alloys]. Moscow : Metallurgy Publ., 1986, 142 p. (in Russian).
8. Rikalin N.N., Uglov A.A., Zuev I.V. and Kokora A.N. *Lazernaja i elektronoluchevaja obrabotka materialov* [Laser and electron-beam treatment of materials]. Moscow : Machine Building Publ., 1985, 496 p. (in Russian).
9. Denisenko A.I., Tsotsko V.I., Spiridonova I.M. and Peleshenko B.G. *Rozpodil tempetaruti odnovimirnogo zrazka v umovah mistsevoi termoobrobki* [Temperature distribution of the one-dimensional sample in terms of local heat treatment]. *Fizika i himija tverdogo tila* [Physics and Chemistry of Solid State] 2008, vol. 9, no. 1, pp. 181–184 (in Ukrainian).
10. Gubenko S.I. *Vozmozhnosti transformatsii nemetallicheskih vkluchenij I mizhphasnih granits vcluchenie-matritsa pri visokoenergeticheskikh obrabotkah* [Possibilities of transformation of non-metallic inclusions and interphase inclusion-matrix boundaries under high-energy treatments]. *Metaloiphizika, noveishie tehnologii* [Metal Physics, New Technologies]. 2014, vol. 36, no. 3, pp. 287–315. (in Russian).

Статья рекомендована д-ром техн. наук, проф. В. С. Вахрушевой (Украина); д-ром техн. наук, проф. В. И. Большаковым (Украина).

Поступила в редакцию 03.04.2018.

Принята в печать 10.04.2018.