

0,05-0,5T]. Metal Physics and newest technologies. 2002, vol. 24, no. 2, pp. 251-269.

**Purpose.** Study of the fine structure under intense plastic deformation (IPD) by torsion under hydrostatic pressure (CGD) to improve the complex of physicomechanical properties of hot-rolled ultra low-carbon steel 01YT.

**Methodology.** Electron microscopy studies were performed with a JEM microscope JEOL. To assess the mechanical properties, the tests were carried out using the CSM (Continuous Stiffness Measurement) module, with a continuous recording of the loading and unloading curve.

**Findings.** The results of the investigation of the formation of the fine structure of OCTT steel after hot rolling followed by IPD by the KGD method at a temperature of 25 °C are presented. It has been established that after ultra-hard rolling with subsequent deformation by the KGD method, ultrafine-grained (UMZ) structure with elements of a nanostructure with crystallite size less than 100 nm in the (110) and

(220) planes is formed. It has been determined that the hardness values of hot-rolled steel 01CTT with subsequent deformation by the KGD method increase by 2.9 times in comparison with the hot-rolled state, the modulus of elasticity increases by 15 %.

**Originality.** For the first time, the possibility of forming an ultrafine-grained (UMZ) structure with crystallite sizes of less than 100 nm in the process of KGD of hot-rolled steel 01YTT is shown for the first time.

**Practical value.** Achieving high strength and plasticity, necessary for the creation of new promising structural and functional materials.

**Key words:** IF-steel, Young's modulus, intensive plastic deformation (IPD), torsion under hydrostatic pressure (KGD).

Рекомендована к публикации  
д. т. н. В. З. Куцовой

Поступила 23.05.2017



Посвящается памяти Ю.Н. Тарана-Жовнира

Наука

УДК 669.14.018.295:620.192

С. И. Губенко, В. Н. Беспалько,  
И. А. Никульченко

Национальная металлургическая академия  
Украины, г. Днепро, Украина

## Влияние структуры зоны насыщения стальной матрицы, полученной при лазерной обработке, на развитие трещин вблизи неметаллических включений при последующей деформации

S. I. Gubenko, V. N. Bospalko, I. O. Nikulchenko National Metallurgical Academy of Ukraine, Dnipro, Ukraine

## The influence of saturation zones of steel matrix obtained at laser treatment on the development of cracks near non-metallic inclusions under subsequent deformation

**Целью работы** является выявление основных закономерностей трансформации межфазных границ включение – матрица и формирования зон контактного взаимодействия при лазерной обработке сталей и влияние этих зон на развитие трещин вблизи неметаллических включений при пластической деформации. Установлено, что при лазерном упрочнении сталей, содержащих неметаллические включения, происходит совмещение лазерной термообработки с микролегированием локальных участков матрицы от внутренних источников – неметаллических включений. Уровень лазерного упрочнения границы включение – матрица определяется оптимальным соотношением скоростей диссипативных и активационных процессов. Исследование особенностей формирования зон контактного взаимодействия в стальной матрице и включениях, а также упрочнения границ включение – матрица позволило выявить ряд закономер-

ностей трансформации этих границ при лазерном воздействии. Показано, что локальная микросварка в момент лазерного воздействия способствует повышению когезивной прочности этих границ, а развитие трещин от включений в стальную матрицу тормозится в пределах зон насыщения.

**Научная новизна.** Установлены особенности строения градиентных и композитных микрзон, которые возникают при взаимодействии неметаллических включений и стальной матрицы в момент лазерного воздействия, и их влияния на локальное упрочнение стальной матрицы, а также образование и развитие трещин вблизи включений при пластической деформации.

**Практическая значимость.** На основе полученных результатов появляется возможность разработать режимы лазерной обработки, позволяющие использовать неметаллические включения как внутренние источники микролегирования, благодаря чему можно будет целенаправленно влиять на уровень упрочнения стали при ЛТО, а также трещиностойкость сталей. (Ил. 3. Табл. 1. Библиогр. 7 назв.)

**Ключевые слова:** сталь, неметаллические включения, граница включения – матрица, лазерная обработка, когезивная прочность, трещины, пластическая деформация.

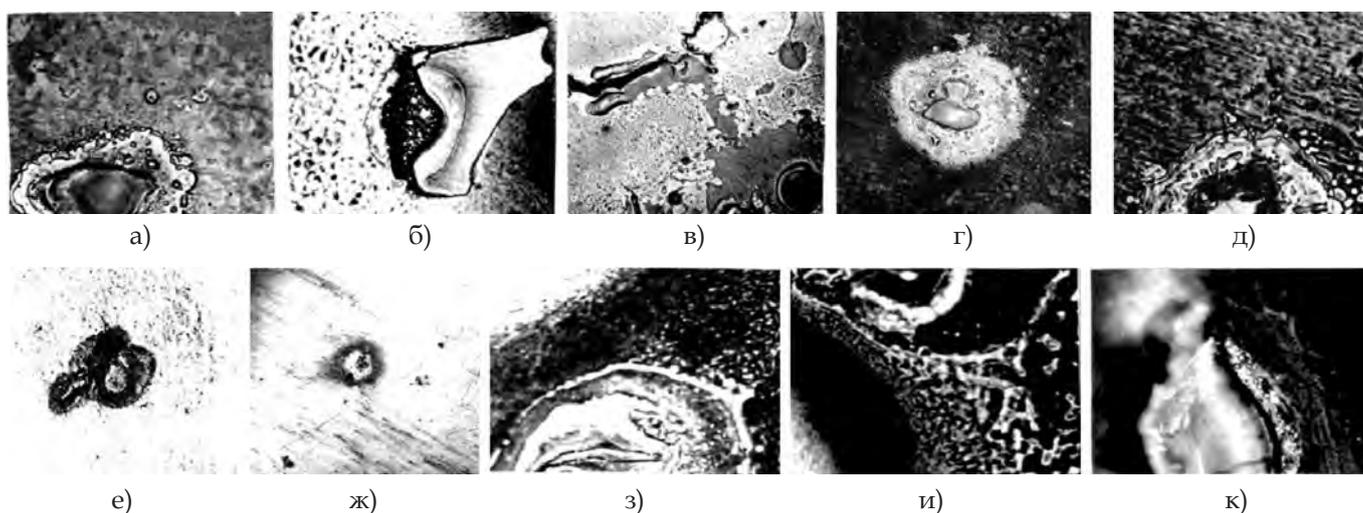
**Введение.** В процессе лазерного воздействия между включением и стальной матрицей происходит скоростной обмен атомами через границу раздела в условиях аномально высокой подвижности атомов, не отвечающей условиям классической диффузии (аномальный массоперенос) [1–4]. Движущей силой обмена атомами через границу является перепад химических потенциалов элементов, содержащихся во включении и окружающей матрице. Для любого импульсного воздействия характерно аномальное ускорение массопереноса [2], а также неравномерное распределение температуры [5; 6]. Коэффициенты диффузии атомов решетки (железа) и атомов замещения вблизи температур плавления сталей в случае лазерного облучения превышают равновесную величину на порядок [7], коэффициенты диффузии атомов внедрения возрастают еще больше. Процессы массопереноса, протекающие при лазерном воздействии, облегчаются нагревом до высоких температур и движением дефектов кристаллического строения, возникающих при тепловом ударе, плавлением и конвективным массопереносом, электронным и электромагнитным взаимодействием включений и матрицы, образованием в поверхностных участках включений зон с повышенной плотностью дислокаций. В неравновесных условиях лазерного воздействия направленный массоперенос элементов через границы включения – матрица является комплексной величиной, зависящей от уровня и неоднородности достигаемых

температур, напряжений, химических потенциалов элементов и других факторов. Целью работы является исследование влияния структуры зон контактного взаимодействия между включениями и стальной матрицей при ЛТО на развитие трещин при последующей деформации.

**Материалы и методики.** 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 при энергии импульса 10, 18, 25 и 30 Дж. Скорость нагрева составляла  $10^5$  °С/с, время воздействия импульса – (1,0, 2,5, 3,6, 4,2 и 6,0)· $10^{-3}$  с, скорость охлаждения –  $10^6$  °С/с, плотность мощности излучения –  $4 \cdot 10^4$  кВт/см<sup>2</sup>. При исследовании образования трещин образцы сталей подвергали растяжению в вакууме при температурах 1000...1250 °С на установках Инстрон-1195 и Имаш-5С.

**Результаты исследований и их обсуждение.** В соответствии с принципами неравновесной термодинамики при лазерном воздействии система взаимодействующих объектов включение – межфазная граница – матрица претерпевает стадию движения через границу квазичастиц – фононов, а затем – атомов компонентов включения и (или) матрицы. Ранее было установлено [1; 2], что массоперенос через границы включения – матрица приводит к насыщению зон матрицы, прилегающих к включениям, компонентами включений, причем и в случаях оплавления включений и матрицы, и в твердом состоянии. Поверхность включений, особенно в случаях их оплавления, насыщается компонентами матрицы благодаря движению атомов матрицы в противоположном направлении, что было подтверждено результатами микрорентгеноспектрального анализа и ОЖЕ-спектроскопии [1; 2]. В условиях резкого охлаждения атомы элементов, перешедшие из включений в матрицу, фиксируются в твердом растворе. Зоны матрицы вблизи включений представляют собой пересыщенный компонентами включений твердый раствор [1–4]. Однако эти процессы нуждаются в дальнейших исследованиях.

Анализ участков стальной матрицы, прилегающих к включению, показал, что их структура неоднородна. Возможны несколько вариантов их строения, выявленного тепловым травлением в процессе лазерного воздействия. Это может быть одна зона насыщения (рис. 1а–1д), либо две (рис. 1е–1з) или три (рис. 1и), при этом в неметаллическом включении может вовсе не быть приповерхностной зоны насыщения, либо может быть одна или две зоны,



**Рис. 1. Зоны взаимодействия матрицы с неметаллическим включением при лазерном воздействии:**  
 а) -  $Al_2O_3$ , R7, б) -  $(Fe, Mn)S$ , 08кп, в) -  $FeS-(Fe, Mn)S$  (НБ-57), г) -  $TiCN$ , 08Т, д) -  $SiO_2$ , ЭЗ, е) -  $(Fe, Mn)O$ , R7, ж) -  $Al_2O_3$ , R7, з), и) -  $FeS-(Fe, Mn)S$ , НБ-57, к) -  $Al_2O_3$ , 08Ю; а), б) -  $\times 500$ , в)-и) -  $\times 500 \times 6$

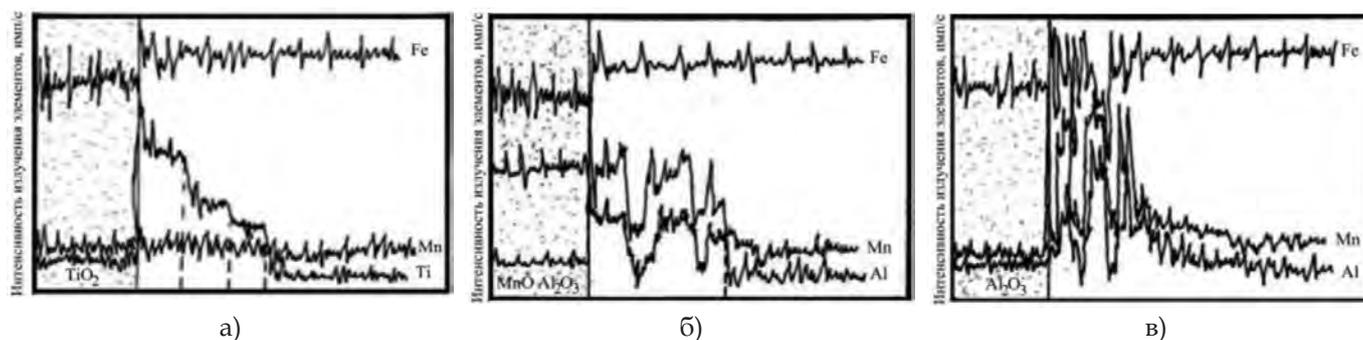
что согласуется с результатами, приведенными в работах [1–4]. Количество зон насыщения в матрице вблизи включений не зависело от типа и состояния включения в момент лазерного воздействия, однако зависело от режима лазерной обработки: чем выше энергия импульса и больше время воздействия, тем больше тенденция к появлению многослойных формирований. Это обусловлено активацией процесса массопереноса элементов из включений в матрицу при увеличении энергии лазерного импульса и увеличении возможности его реализации при росте продолжительности воздействия.

Участки матрицы, прилегающие к включению, отличаются распределением химических элементов. При наличии двух или трех зон насыщения наблюдали перепады концентраций с сохранением постепенного уменьшения содержания элементов в пределах каждой зоны (рис. 2а).

Таким образом, при наличии нескольких зон насыщения в матрице наблюдали своеобразный каскад концентраций элементов в зонах взаимодействия матрицы и включения при удалении

от включения. Соотношения концентрации компонентов в этих зонах были разными и колебались в пределах 1,2...1,8 раза, что связано, по-видимому, с неоднородным полем температур и напряжений, а также волновым характером скоростного массопереноса в условиях импульсного лазерного воздействия, представляющего собой локальный тепловой удар [7].

Действие лазерного импульса подобно взрыву, при этом происходит волновая релаксация напряжений. Здесь можно предположить, что волны релаксации напряжений сопровождают массоперенос: первая волна – самая дальняя; вторая – короче по расстоянию действия от включения и накладывается на зону действия первой волны; третья – соответственно, еще короче и накладывается на зоны действия первых двух волн. Следует отметить еще один тип распределения элементов включения в прилегающих участках матрицы. При коллективном массопереносе, связанном с растворением в матрице зерен включения, наблюдали не каскадное, а «пятнистое» распределение элементов включения в прилегающих участках матрицы (рис. 2б),



**Рис. 2. Распределение элементов в зонах насыщения матрицы вблизи включения после лазерного воздействия**

что косвенно подтверждает возможность существования механизма растворения (плавления) включений с ультрадисперсной структурой.

Результаты изучения распределения нанотвердости матрицы непосредственно в участках, прилегающих к включениям, показали, что вблизи включений (одна зона, либо первая зона при наличии нескольких зон насыщения) нанотвердость значительно превышает среднее ее значение для матрицы вдали от включений (табл. 1). Величина нанотвердости матрицы зависит от типа стали, поскольку степень упрочнения стали в процессе лазерного облучения и закалки зависит от ее состава и структуры, определяющих механизм упрочнения. В первой (или единственной) зоне насыщения значения ( $H_M^p$ ) в 1,45...1,8 раз выше (коэффициент  $K_B$ ), чем в матрице вдали от включения, что близко к результатам, полученным в работах [1; 2] при определении микротвердости матрицы вблизи включений без разделения отдельных зон насыщения. Затем во второй и третьей зонах значения нанотвердости ниже, чем в первой зоне, но превышают величины  $H_M$  вдали от включений соответственно в 1,25...1,64 и 1,1...1,3 раза. Таким образом, наблюдается своеобразный каскад значений нанотвердости матрицы при удалении от включений.

Главным фактором упрочнения прилегающих к включениям участков матрицы является ее микролегирование от внутренних источников, которыми выступают неметаллические включения. Создание каскада зон насыщения матрицы вблизи включений путем формирования локальных ликвационных зон – это формирование своеобразных слоистых композитов вблизи неметаллических включений. Следует отметить, что структура этих зон может быть

однофазной (пересыщенные твердые растворы), но часто в зонах наблюдаются дисперсные «сателлитные» частицы (рис. 1а, 1в–1д, 1з, 1к).

Как правило, химический состав этих частиц связан с исходным включением, но несколько отличается от него благодаря участию в их формировании компонентов матрицы (рис. 2в). Встречаются также частицы, имеющие метастабильный состав, что связано с их образованием в условиях скоростного лазерного воздействия. Процесс образования «сателлитных» включений обсуждается в работе [4]. Появление «сателлитных» частиц способствует созданию дисперсных композитных слоев, либо при наличии в матрице нескольких зон насыщения – комбинированных слоисто-дисперсных участков вблизи включений. Причем варьирование режима лазерного воздействия позволит регулировать формирование этих композитных систем.

Таким образом, микронеоднородное упрочнение стальной матрицы при лазерном воздействии вблизи включений связано не только с действием тех же факторов, что и вдали от включений [1–4], но также с возникновением вблизи включений термических напряжений и повышенного количества дефектов кристаллического строения; локализацией высокоскоростных релаксационных процессов; с формированием градиентных и композитных зон различных типов (слоистых каскадного типа, пятнистых, дисперсных), что связано с насыщением и пересыщением прилегающих участков матрицы компонентами включений и образованием новых микрочастиц. По-видимому, наличие каскадных зон свидетельствует о волновой природе насыщения матрицы элементами включения.

Таблица 1

**Значения нанотвердости зон насыщения матрицы вблизи включений ( $H_M^p$ ) и вдали от них ( $H_M$ ), а также коэффициента  $K_B$  (в скобках) при энергии импульса 25 Дж и времени воздействия  $3,6 \cdot 10^{-3}$  с**

Включение	Состояние вкл./матр.*	Сталь, $H_M$ , $\times 10$ , МПа	$H_M^p$ , $\times 10$ , МПа, в зонах		
			1	2	3
$Al_2O_3$ , $MgO \cdot Al_2O_3$	опл. / ж	R7,620	1100(1,77) 1085(1,75)	– 942(1,52)	– 744(1,2)
$SiO_2$	т / ж т / т	R7,620	1080(1,74) 960(1,55)	858(1,38) –	– –
$MnO \cdot SiO_2$ $FeO \cdot SiO_2$	ж / ж	НБ-57, 748	1130(1,51) 1260(1,68)	1050(1,40) 950(1,27)	– 810(1,08)
TiN, TiCN	т, опл. / ж	08Т, 280	502(1,79)	380(1,36)	–
TiO, $TiO_2$	т / ж	08Т, 280	430(1,54)	–	–
$FeO \cdot TiO_2$	опл. / т	08Т, 280	460(1,64)	385(1,38)	–
(Mn,Fe)S	ж / т ж / ж	08кп, 260	395(1,52) 430(1,65)	– 374(1,44)	– 320(1,23)

\*Примечание: т – твердое; ж – жидкое; опл. – оплавление.

Описанные процессы свидетельствуют о локальной гетерогенизации микроструктуры матрицы стали вблизи включений при лазерном воздействии.

Исследовано влияние структуры зон насыщения стальной матрицы на развитие трещин вблизи включений при последующей деформации. В работах [1; 2] было установлено, что предварительное лазерное воздействие способствует образованию хрупких трещин и расслоений вдоль границ включение – матрица, т. е. изменению типа микроразрушений вблизи включений, склонных к образованию полостей при обычном растяжении. В случаях, когда вблизи включений после ЛТО возникали зоны насыщения стальной матрицы элементами включений (пересыщенные твердые растворы), не имеющие признаков градиентных либо композитных структур, хрупкие расслоения на границах включение – матрица вырастают практически мгновенно, тогда как полости без предварительной ЛТО развиваются значительно медленнее при всех температурах в результате пластической деформации матрицы. Дальнейшее развитие деформации стали приводит к распространению трещин от включений в матрицу, причем обнаружены три варианта их

развития. Первые два этапа связаны с ранее образовавшимися микроразрушениями, поскольку хрупкие расслоения и трещины из включений могут продолжаться в матрицу. Кроме того, вблизи включений, как правило, около их концов или острых углов, появляются трещины, не связанные с микроразрушениями, возникшими на более ранних этапах деформации. Количество этапов, как и в случае растяжения без облучения, осталось прежним, однако их характер и параметры развития существенно изменились. Лазерное облучение способствовало увеличению критических размеров включений всех типов и степени деформации, когда зарождались микроразрушения.

Однако при наличии после ЛТО зон насыщения стальной матрицы элементами включений, имеющих градиентную, композитную структуру либо структуру смешанного типа, развитие трещин имеет свои особенности. Распространение трещин от включений замедляется в зонах пластической релаксации напряжений (рис. 3а), а также благодаря измельчению зеренной структуры стальной матрицы вследствие развития скоростной лазерной рекристаллизации (рис. 3б). Кроме того, в участках насыщения стальной матрицы градиентного (каскадного)

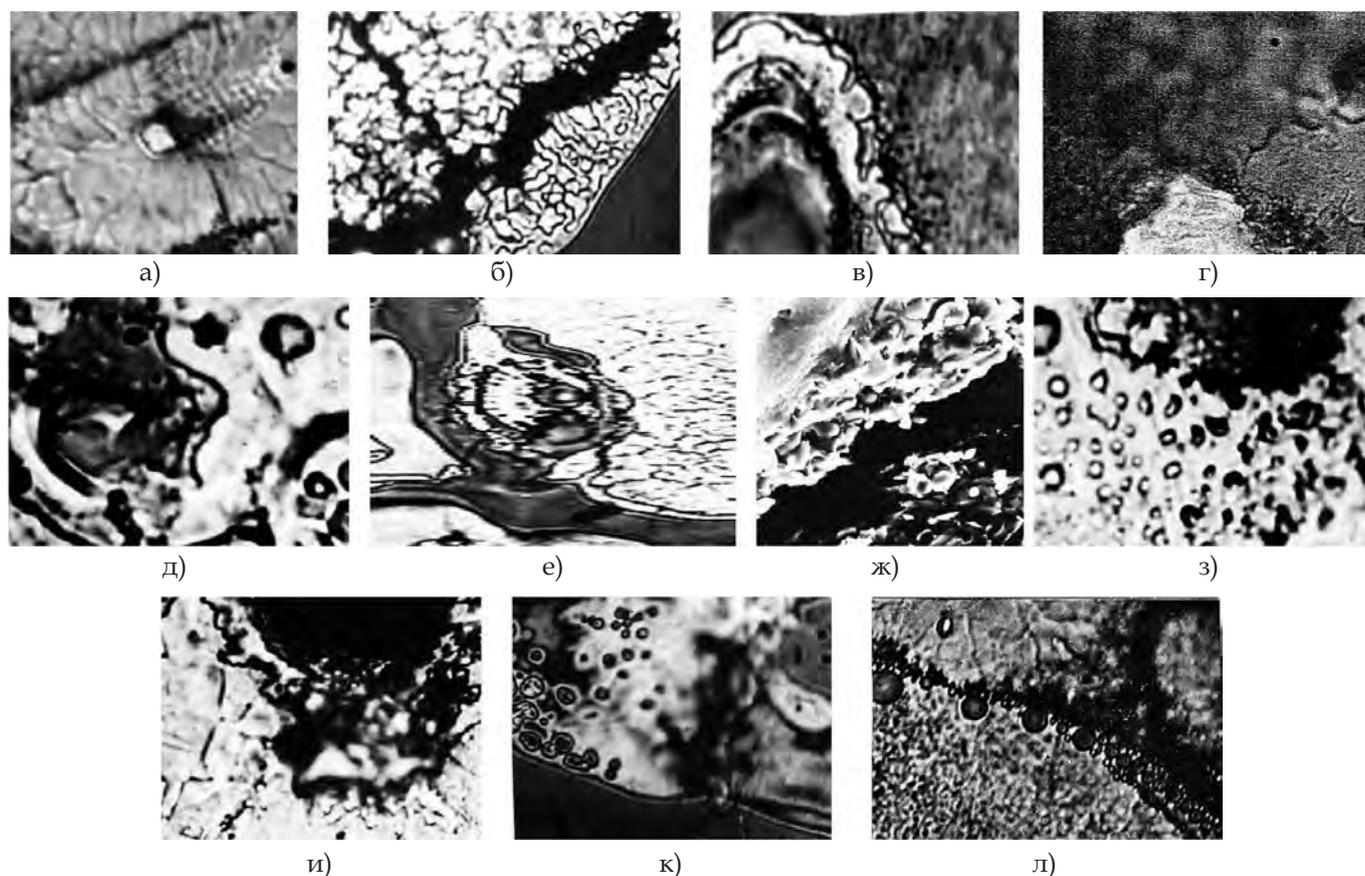


Рис. 3. Развитие трещин в зонах насыщения стальной матрицы компонентами включений различных типов в процессе деформации при температурах 25 (а, д, ж, н, р), 600 (б, з, к, с), 900 (г, е, и, л) и 1100 °С (в, м, о, п, т, у):  $\times 500\times 4$

типа происходило изменение направления развития трещин, связанное с переходом от одного слоя к другому, имеющих различный химический состав, а значит, и различные прочностные и пластические свойства (рис. 3в, 3г). Это способствовало изгибу и ступенчатому распространению трещин, а также торможению их развития. В участках насыщения стальной матрицы пятнистого типа также наблюдали изгиб трещин и торможение их развития (рис. 3д, 3е), что связано с различным химическим составом, а значит, и различными прочностными и пластическими свойствами отдельных «пятен» насыщения.

В участках насыщения стальной матрицы со структурой дисперсного композита наблюдали изгиб трещин и торможение их роста при встрече с дисперсными «сателлитными» частицами (рис. 3ж, 3з). Очевидно, в этих случаях проявляется влияние полей напряжений вблизи дисперсных «сателлитных» частиц, которые взаимодействуют с полем напряжений в русле растущей трещины. Наконец, в участках насыщения стальной матрицы, имеющих структуру комбинированного типа, также наблюдали изгиб трещин и торможение их развития (рис. 3и–3л). В этих случаях проявляется действие нескольких факторов, связанных с влиянием распределения напряжений и различием химического и фазового состава отдельных зон насыщения.

Таким образом, лазерное облучение способствует не только образованию хрупких трещин и расслоений вдоль границ включения – матрица, т. е. изменению типа микроразрушений вблизи включений, склонных к образованию полостей при обычном растяжении. Проявляется также влияние структуры градиентных, пятнистых и композитных зон насыщения стальной матрицы на распространение трещин от включений, связанное с их торможением в пределах этих участков. Зоны насыщения стальной матрицы градиентного, пятнистого, дисперсного и смешанного типов, как правило, служат препятствием для распространения трещин от включений вглубь стальной матрицы.

**Выводы.** При лазерном упрочнении сталей, содержащих неметаллические включения, происходит совмещение лазерной термообработки с микролегированием локальных участков матрицы от внутренних источников – неметаллических включений. В стальной матрице вблизи включений в момент лазерного воздействия формируются локальные градиентные и композитные зоны, определяющие не только уровень лазерного упрочнения сталей, но также способствующие торможению развития трещин от включений в стальную матрицу при последующей пластической деформации.

## Библиографический список / References

1. Губенко С. И. Трансформация неметаллических включений в стали / С. И. Губенко. – М.: Металлургия, 1991. – 225 с.

Gubenko S. I. *Transformatsiya nemetallicheskih vklyucheniy v stali*. Moscow, Metallurgiya, 1991, 225 p.

2. Губенко С. И. Неметаллические включения в стали / С. И. Губенко, В. В. Парусов, И. В. Деревянченко. – Днепропетровск: АРТ-ПРЕСС, 2005. – 536 с.

Gubenko S. I., Parusov V. V., Derevyanchenko I. V. *Nemetallicheskie vklyucheniya v stali*. Dnepropetrovsk, ART-PRESS, 2005, 536 p.

3. Губенко С. И. Возможности трансформации неметаллических включений и межфазных границ включение-матрица при высокоэнергетических обработках / С. И. Губенко // *Металлофизика, новейшие технологии*. – 2014. – Т. 36, № 3. – С. 287–315.

Gubenko S. I. *Vozmozhnosti transformatsii nemetallicheskih vklyucheniy i mezhfaznykh granits vklyuchenie-matritsa pri vysokoenergeticheskikh obrabotkakh*. *Metallofizika, noveyshie tekhnologi*. 2014, vol. 36, no. 3, pp. 287-315.

4. Губенко С. И. Градиентные и композитные зоны контактного взаимодействия включений и стальной матрицы после лазерного воздействия / С. И. Губенко, И. А. Никульченко // *Строительство, материаловедение, машиностроение: сб. науч. тр. / Приднепр. гос. акад. стр-ва и архитектуры*. – Днепропетровск, 2015. – Вып. 80. – С. 118–122.

Gubenko S. I., Nikul'chenko I. A. *Gradientnye i kompozitne zony kontaktnogo vzaimodeystviya vklyucheniy i stal'noy matritsy posle lazernogo vozdeystviya*. *Stroitel'stvo, materialovedenie, mashinostroenie*. Dnepropetrovsk, 2015, issue 80, pp. 118-122.

5. Денисенко О.И. Формування поля температур тонкої стрічки під впливом на її поверхню дисперсної фази двофазного струменя / О. І. Денисенко, В. І. Цоцко, І. М. Спиридонова, Б. Г. Пелешенко // *Фізика і хімія твердого тіла*. – 2008. – Т. 9, № 4. – С. 901–904.

Denisenko O. I., Tsotsko V. I., Spiridonova I. M., Peleshenko V. G. *Formuvannya polya temperatur tonkoї strichki pid vplivom na її poverkhnyu dispersnoi fazi dvofaznogo strumenya*. *Fizika i khimiya tverdogo tila*. 2008, vol. 9, no. 4, pp. 901-904.

6. 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*. – 2008. – Т. 9, № 1. – С. 181–184.

Denisenko O. I., Tsotsko V. I., Spiridonova I. M., Peleshenko V. G. *Rozpodil temperaturi odnovimirnogo*

*zrazka v umovakh mistsevoi termoobrobki. Fizika i khimiya tverdogo tila. 2008, vol. 9, no. 1, pp. 181-184.*

7. Леонтьев П. А. Лазерная поверхностная обработка металлов и сплавов. / П. А. Леонтьев, Н. Т. Чеканов, М. Г. Хан. – М.: Metallurgiya, 1986. – 142 с.

Leont'ev P. A., Chekanov N. T., Khan M. G. *Lazernaya poverkhnostnaya obrabotka metallov i splavov.* Moscow, Metallurgiya, 1986, 142 p.

**Purpose.** The goal of work is elucidation of principal generalities of transformation of interphase inclusion-matrix boundaries and formation of zones of contact interaction under laser treatment of steels and influence of these zones on the development of cracks near non-metallic inclusions during plastic deformation. It was fixed under laser strengthening of steels containing non-metallic inclusions takes place combination laser heat treatment with micro-alloying of local section of matrix from inner sources – non-metallic inclusions. The level of strengthening of inclusion-matrix boundary is defined by optimal relationship of speeds of dissipation and activation processes. Investigation of peculiarities of formation of contact interaction zones in steel matrix and inclusions and also of the strengthening of inclusion-

*matrix boundaries was allowed to determine the series of principles of their transformation under laser action and their influence on the local strengthening of steel matrix. It was shown that local microwelding in the moment of laser action promotes raise the cohesive strength of these boundaries.*

**Originality.** The peculiarities of structure of gradiental and composite micro-zones arising in the moment of laser action and also their influence on the formation and development of cracks near non-metallic inclusions during plastic deformation were determined.

**Practical value.** 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 strengthening of steel under laser treatment and also on the cracking resistance of steels.

**Key words:** steel, non-metallic inclusions, inclusion-matrix boundary, laser treatment, cohesive strengthening, cracks, plastic deformation.

**Рекомендована к публикации**  
д. т. н. В. З. Куцовой

**Поступила 23.05.2017**



УДК 669.15.74.-194-15.669.17

Наука

Л. С. Малинов /д. т. н./, Д. В. Бурова /к. т. н./

Приазовский государственный технический университет, г. Мариуполь, Украина,  
e-mail: Malinovadasha@yandex.ru

## Влияние термообработки с нагревом в межкритический интервал температур на структуру, фазовые превращения и механические свойства малоуглеродистой низколегированной стали

L. S. Malinov /Dr. Sci. (Tech.),  
D. V. Burova /Cand. Sci. (Tech.)/

Priazov State Technical University,  
Mariupol, Ukraine,  
e-mail: Malinovadasha@yandex.ru

## Influence of heat treatment with heating in the intercritical temperature interval on the structure, phase transformations and mechanical properties of low-carbon low-alloy steel

**Цель.** Изучение влияния термической обработки с нагревом в межкритический интервал температур (МКИТ) на структуру, фазовые превращения и механические свойства стали 25Х1М1Ф.

**Методика.** Проводилось построение термодинамических диаграмм (ТКД) изучаемой стали при ее охлаждении с различными скоростями из аустенитной области и МКИТ. В исследованиях применялись дю-