

УДК 669.18

## ВЛИЯНИЕ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ НА «ГОРЯЧЕЕ» И «ХОЛОДНОЕ» ПРОСКАЛЬЗЫВАНИЕ ВКЛЮЧЕНИЙ И СТАЛЬНОЙ МАТРИЦЫ

ГУБЕНКО С.И. <sup>1\*</sup>, *д.т.н, проф.*,  
НИКУЛЬЧЕНКО И.А. <sup>2</sup>, *аспирант*

<sup>1\*</sup> Кафедра материаловедения, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49600, Днепр, Украина, тел. +38 (056) 3748 357, e-mail: sigubenko@gmail.com, orcid.org/0000-0001-5427-1154

<sup>2</sup> Кафедра материаловедения, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49600, Днепр, Украина, тел. +38 (056) 3748 357 orcid.org/0000-0003-2184-8230

**Аннотация.** *Цель.* Проблема влияния неметаллических включений на пластическое поведение сталей является актуальной. Целью работы было изучение влияния лазерного воздействия на процессы «холодного» и «горячего» проскальзывания неметаллических включений и стальной матрицы. *Методика.* После лазерной обработки разрывные образцы из сталей 08Ю, 08Х28Н10Т, R7, НБ-57 подвергали растяжению на установке ИМАШ-5С при температурах 25...1200 °С со скоростью деформации V<sub>1</sub> 800, V<sub>2</sub> 1680 и V<sub>3</sub> 2000 мм/мин. Применяли методы исследования – оптическая микроскопия, высокотемпературная металлография. *Результаты.* Установлено, что лазерное воздействие оказывает сдерживающее влияние на «горячее» проскальзывание вдоль межфазных границ включение-матрица при высокотемпературной деформации. Показано, что лазерное воздействие тормозит «холодное» проскальзывание неметаллических включений в стальной матрице при низкотемпературной деформации. Показано, что влияние лазерной обработки на пластическое поведение межфазных границ включение-матрица связано с упрочнением этих границ. Установлено, что эффект лазерного упрочнения границ включение-матрица выражен максимально в интервале энергий лазерного луча 18...25 Дж. *Научная новизна.* Установлены особенности влияния лазерной обработки на различные виды проскальзывания, связанного с неметаллическими включениями, а именно – на «горячее» проскальзывание вдоль межфазных границ включение-матрица при высокотемпературной деформации и «холодное» проскальзывание неметаллических включений в стальной матрице при низкотемпературной деформации. *Практическая значимость.* Использование полученных результатов позволит разработать методы и режимы лазерной обработки, позволяющие влиять на характер пластического поведения межфазных границ включение-матрица, а также сталей при пластической деформации.

*Ключевые слова:* межфазные границы включение-матрица, лазерное воздействие, проскальзывание

## ВПЛИВ ЛАЗЕРНОЇ ОБРОБКИ НА «ГАРЯЧЕ» ТА «ХОЛОДНЕ» ПРОСКОВЗУВАННЯ ВКЛЮЧЕНЬ ТА СТАЛЕВОЇ МАТРИЦІ

ГУБЕНКО С.І. <sup>1\*</sup>, *д.т.н, проф.*,  
НИКУЛЬЧЕНКО І.О. <sup>2</sup>, *аспірант*

<sup>1\*</sup> Кафедра матеріалознавства, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 3748 357, e-mail: sigubenko@gmail.com, orcid.org/0000-0001-5427-1154

<sup>2</sup> Кафедра матеріалознавства, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 3748 357 orcid.org/0000-0003-2184-8230

**Анотація.** *Мета.* Проблема впливу неметалевих включень на пластичну поведінку сталей є актуальною. Метою роботи було вивчення впливу лазерної дії на процеси «холодного» та «гарячого» проковзування неметалевих включень і сталевій матриці. *Методика.* Після лазерної обробки зразки для розтягування із сталей 08Ю, 08Х28Н10Т, R7, НБ-57 піддавали розтягненню на установці ИМАШ-5С при температурах 25...1200 °С з швидкістю деформації V<sub>1</sub> 800, V<sub>2</sub> 1680 и V<sub>3</sub> 2000 мм/хв. Застосовували методи дослідження - оптична микроскопія, високотемпературна металлография. *Результати.* Встановлено. Що лазерна дія чинить стримуючий вплив на «гаряче» просковзування уздовж міжфазних границь включення-матрица при високотемпературній деформації. Показано, що лазерна дія гальмує «холодне» просковзування неметалевих включень в сталевій матриці при низькотемпературній деформації. Показано, що вплив лазерної обробки на пластичну поведінку міжфазних границь включення-матрица пов'язаний з зміцненням цих границь. Встановлено, що ефект лазерного зміцнення границь включення-матрица виражений максимально в інтервалі енергій лазерного променя 18...25 Дж. *Наукова новизна.* Встановлено особливості впливу лазерної обробки на різні види просковзування, пов'язаного з неметалевими включеннями, а саме – на «гаряче» просковзування уздовж міжфазних границь включення-матрица при високотемпературній деформації і «холодне» просковзування неметалевих включень в сталевій матриці при низькотемпературній деформації. *Практична значимість.* Використання отриманих результатів дозволить розробити методи і режими лазерної обробки, що дозволяють впливати на характер пластичної поведінки міжфазних границь включення-матрица, а також сталей при пластичній деформації.

*Ключові слова:* міжфазні границі включення-матрица, лазерна дія, просковзування.

## INFLUENCE OF LASER TREATMENT ON THE “HOT” AND “COLD” SLIPPING OF INCLUSIONS AND STEEL MATRIX

GUBENKO S.I. <sup>1\*</sup>, DR. SC. (TECH.), PROF.  
NIKULCHENKO I.O. <sup>2</sup>, post graduate

<sup>1\*</sup> Material Science Department, National Metallurgical Academy Of Ukraine, Gagarin av., 4, 49600, Dniepr, Ukraine, phone +38 (056) 3748 357, e-mail: sigubenko@gmail.com, orcid.org/0000-0001-5427-1154

<sup>2</sup> Material Science Department, National Metallurgical Academy Of Ukraine, Gagarin av., 4, 49600, Dniepr, Ukraine, phone +38 (056) 3748 357, e-mail: sigubenko@gmail.com, orcid.org/0000-0003-2184-8230

**Abstract. Purpose.** The problem of influence of non-metallic inclusions on the plastic behavior of steels is actual problem.

The goal of work was investigation of influence of laser action on the processes of “cold” and “hot” slipping of non-metallic inclusions and steel matrix. **Methods.** After laser treatment tensile specimens of steels 08U, 08H18N10T, R7, NB-57 were tested on the installation IMASH-5S under temperatures 25...1200 °C with deformation speed V<sub>1</sub> 800, V<sub>2</sub> 1680 and V<sub>3</sub> 2000 mm/min.

We used research methods - optical microscopy, high-temperature metallography. **Results.** It was found that laser action has a deterrent effect on the “hot” slipping along interphase boundaries inclusion-matrix under high-temperature deformation. It was shown that laser action brakes the “cold” slipping of non-metallic inclusions in steel matrix under low-temperature deformation. It was shown that the influence of laser treatment on the plastic behavior of interphase boundaries inclusion-matrix connects with strengthening of these boundaries. It was found that effect of laser strengthening of inclusion-matrix boundaries is maximum in the interval of laser beam energies 18...25 J. **Scientific novelty.** The peculiarities of the influence of laser treatment on the different types of slipping connecting with non-metallic inclusions, namely “hot” slipping along interphase boundaries inclusion-matrix under high-temperature deformation and “cold” slipping of non-metallic inclusions in steel matrix under low-temperature deformation was founded. **Practical significance.** Using the results obtained enable to develop methods and regimes of laser treatment allowing to influence on the character of plastic behavior of interphase boundaries inclusion-matrix and also of steels under plastic deformation.

**Keywords:** interphase boundaries inclusion-matrix, laser treatment, slipping

### Введение

Как было показано в работах [1- 2], при лазерном облучении сталей вблизи включений образуются сложные градиентные и композитные зоны с различной структурой, кроме того, происходит сложная трансформация межфазных границ включение-матрица, поэтому изучено их поведение при последующей высокотемпературной деформации растяжением. Включения являются концентраторами напряжений и деформаций при разных условиях нагружения [1- 3]. Для лазерного воздействия характерно аномальное ускорение массопереноса [4], а также неравномерное распределение температуры [5 - 13].

### Цель

Целью работы является изучение влияния лазерного воздействия на процессы «холодного» и «горячего» проскальзывания неметаллических включений и стальной матрицы.

### Материалы и методики

После лазерной обработки разрывные образцы из сталей 08Ю, 08Х28Н10Т, R7, НБ-57 подвергали растяжению на установке ИМАШ-5С при температурах 25...1200 °С со скоростью перемещения захватов V<sub>1</sub> 800, V<sub>2</sub> 1680 и V<sub>3</sub> 2000 мм/мин. На поверхности образцов на приборе ПМТ-3 при нагрузке 0,5 г наносили ряд реперные точки [1, 2]. Методы исследования процессов проскальзывания приведены в работах [1, 2].

### Результаты исследования и их обсуждение

Изучали проскальзывание вдоль границ включение-матрица при высоких температурах деформации, а также холодное проскальзывание включений в стальной матрице при низких температурах деформации.

В процессе деформации при температурах выше 900°С, как и без предварительного лазерного воздействия, вдоль границ включение-матрица наблюдали развитие проскальзывания. Как правило, оно развивается вдоль всей межфазной границы (рис. 1, а), хотя и не всегда равномерно. Непосредственно на границах включение-матрица обнаружены пики или «всплески» пластической деформации (рис. 2). Характер локализации деформации в матрице и ее численные параметры, зависят от температуры и типа (степени пластичности) неметаллического включения.

Проскальзывание вдоль границ включение-матрица после лазерного воздействия, наблюдали при температурах 1000-1200°С. Предварительное лазерное воздействие повлияло на параметры развития проскальзывания вдоль границ включение-матрица. Величина смещения рисков Δ, характеризующая степень развития проскальзывания, уменьшилась на 10-20% после предварительного лазерного воздействия (табл. 1) по сравнению с данными, приведенными в работе [1, 2] для проскальзывания без ЛТО, причем максимальное снижение этого показателя наблюдали при энергии лазерного импульса 18...25 Дж. С увеличением времени лазерного воздействия влияние ЛТО выражено сильнее. Таким образом, лазерная

обработка способствует повышению устойчивости структуры лазерно-закаленных границ включение-матрица при горячей деформации.

Анализ результатов показал, что проявляется влияние скорости деформирования на изучаемое явление. Для всех температур деформации как для недеформируемых, так и для пластичных включений, обнаруживается максимум смещения рисок при изменении скорости деформирования, что связано, по-видимому, с тем, что вначале увеличение скорости деформирования от  $V_1$  до  $V_2$  приводит к интенсификации движения дефектов (межфазных дислокаций и вакансий) в границах включение-матрица. Увеличение скорости деформирования до  $V_3$  способствует снижению интенсивности

проскальзывания. Таким образом, проявляется деформационное упрочнение лазерно-упрочненных границ включение-матрица. Влияние предварительного лазерного воздействия показало, что эффект лазерного упрочнения границ включение-матрица выражен максимально в интервале энергий лазерного луча (18...25 Дж). Очевидно, при комбинированной обработке стали ЛТО + высокотемпературная деформация реализуются два механизма упрочнения межфазных границ включение-матрица: лазерное (высокоскоростное термическое, которое является многофакторным процессом) и деформационное.



Рис. 1. Проскальзывание вдоль границ включение-матрица после лазерного воздействия (а) и включений в стальной матрице (б, в): а - 1000 °С, б - 25 °С, в – 600 °С

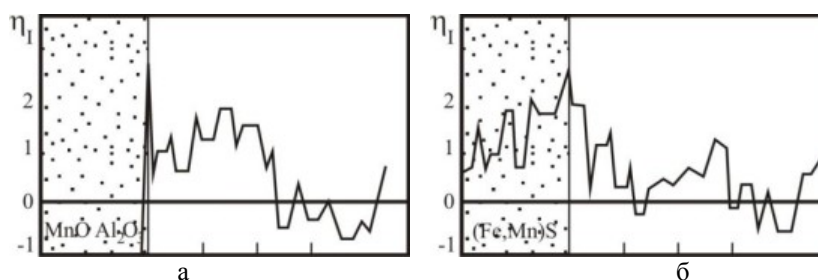


Рис. 2. “Всплески” пластической деформации на границах включение-матрица вдоль реперной линии 1 в колесной стали при температуре 1100°С: а - MnO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, б - (Fe,Mn)S

Таблица 1.

Величина смещения рисок  $\Delta$ , мкм для разных типов включений и сталей при температуре 1100°С и скоростях перемещения захватов соответственно 800 ( $V_1$ ), 1680 ( $V_2$ ) и 2000 ( $V_3$ ) мм/мин при разных режимах предварительной лазерной обработки

$W_{имп}$ , Дж	$\tau_{имп}$ , $\cdot 10^{-3}$ , с	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , MnO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (R7)			(Fe, Mn)S (R7)			Fe S -(Fe, Mn)S (НБ-57)		
		$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_1$	$V_2$	$V_3$
10	1,0	6,3;	9,1;	7,2	9,9;	14,4;	12,6	11,7;	16,2;	14,4
	3,6	6,0;	8,8;	6,3	9,6;	14,0;	12,3	11,2;	15,8;	14,0
18	1,0	5,7;	8,2;	6,6	9,0;	13,1;	11,5	10,7;	14,8;	13,1
	3,6	5,4;	7,8;	6,2	8,7;	13,0;	10,8	10,0;	13,5;	12,5
25	1,0	5,5;	8,0;	6,5	9,0;	12,9;	11,3	10,4;	14,3;	12,7
	3,6	5,2;	7,6;	6,0	8,7;	13,0;	11,3	9,8;	13,0;	12,1
30	1,0	6,4;	9,2;	7,6	9,8;	14,3;	12,4	11,5;	16,0;	14,0
	3,6	6,0;	9,0;	6,7	9,2;	14,0;	12,0	11,0;	16,0;	13,5

Вполне очевидно, что предварительное лазерное воздействие оказывает мощное сдерживающее влияние на проскальзывание. Инкубационный период и скорость проскальзывания несомненно зависят от состояния границы включение-матрица. Пластичность межфазных границ зависит не только от температуры, но также от их энергетических и

адгезионных свойств (когезионной прочности). Лазерное воздействие вносит изменения в механизм проскальзывания. Динамическое контактное взаимодействие неметаллических включений и стальной матрицы происходит через границы, претерпевшие трансформацию благодаря развитию различных процессов взаимодействия включений и

матрицы на разных структурных уровнях. По-видимому, процессы массопереноса, сдвиговое сопряжение, формирование сегрегаций и граничных фаз изменили структурное и энергетическое состояние границ включение-матрица. Эти процессы привели границы включение-матрица в сложное напряженное состояние, причем действие этих факторов может как суммироваться, так и иметь противоположное влияние на степень неравновесности и напряженного состояния этих границ. Однозначно разделить действие перечисленных факторов пока не представляется возможным, однако, их суммарный эффект налицо – это сдерживающее влияние на процесс проскальзывания. По-видимому, подготовительный период перераспределения межфазных дислокаций усложнился в связи с изменением концентрации свободных электронов вблизи дислокаций, что повлияло на скорость электростатического взаимодействия и перераспределения межфазных дефектов в инкубационный период.

«Всплески» деформации, характеризующие степень пластичности межфазной границы включение-матрица, после лазерного воздействия, уменьшились на 10...20 % по сравнению с этими показателями для деформации без ЛТО [1, 2]. В среднем для межфазных границ у недеформируемых включений  $\eta_i = 2,2...3,1$ ,  $K_\epsilon = 3,2...4,1$ ; у пластичных включений -  $\eta_i = 2,7...3,8$ ,  $K_\epsilon = 3,7...4,7$  на разных стадиях деформации. Это говорит о том, что релаксационные процессы сосредоточены на межфазных границах. Чем выше температура, тем больше величины  $\eta_i$  и  $K_\epsilon$ , что свидетельствует о достаточно интенсивном проскальзывании.

Таким образом, при горячей деформации сталей после предварительного лазерного воздействия вблизи неметаллических включений обнаружены «всплески» микронеоднородной деформации, обусловленные проскальзыванием вдоль границ включение-матрица, определена степень их пластичности в зависимости от температуры и скорости деформирования, а также энергии и длительности лазерного импульса. Показано, что предварительное лазерное воздействие оказывает мощное сдерживающее влияние на проскальзывание

и вносит изменения в его механизм в результате изменения структурного и энергетического состояния границ включение-матрица.

Влияние ЛТО проявилось в упрочнении границ включение-матрица, причем установлен интервал энергии лазерного импульса (18...25 Дж), способствующей максимальному упрочнению этих границ. Лазерное воздействие привело к получению межфазных границ включение-матрица, обладающих повышенной стойкостью к деформирующим высокотемпературным воздействиям, но способных эффективно рассеивать подводимую извне энергию в момент пика напряжений с помощью пластической релаксации в результате проскальзывания при высокотемпературной деформации.

Холодное проскальзывание включений в стальной матрице проявляется в вакууме при температурах 25...900 °С (рис. 1, б). Исследования показали, что в процессе пластической деформации при скоростях перемещения захватов  $V_1$  и  $V_2$  при всех исследованных температурах деформации не происходило смещение реперных точек, величина угла вращения (смещения)  $\alpha$  равна нулю (табл. 2). При  $V_3$  такое смещение наблюдали в случае различных включений, не склонных к образованию полостей. Следует отметить, что для включений корунда и шпинели, склонных к образованию полостей (вязких трещин) в результате расслоения вдоль границы включение-матрица при достижении определенной величины (критической) степени деформации, зависящей от температуры [1, 2], смещение реперных точек зафиксировали на стадиях деформации, предшествующих образованию этих микроразрушений (табл. 2).

Величина угла вращения  $\alpha$  зависит от степени пластичности включения, а также от температуры и степени деформации (табл. 2). Чем выше температура, тем он меньше, причем этот показатель возрастает у всех типов включений при увеличении степени деформации. У пластичных включений сульфидов, а также пластичных при температурах выше 600 °С железо-марганцевых силикатов величина  $\alpha$  выше, чем у недеформируемых оксидов, шпинелей, карбонитридов при прочих равных условиях.

Таблица 2

Величина угла вращения (град) реперных точек при разных температурах, степенях ( $\epsilon$ ) и скоростях  $V_1, V_2, V_3$  деформации

Включение, сталь	$\epsilon, \%$	Температура деформации, °С								
		25			600			900		
		$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_1$	$V_2$	$V_3$
TiCN, 08Т	5	0	0	12	0	0	8	0	0	4
	15	0	0	17	0	0	12	0	0	7
	25	0	0	21	0	0	15	0	0	9
MnO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , 08Ю	5	0	0	2	0	0	3	0	0	5
	15	0	0	пол	0	0	пол	0	0	8
	25	0	0	пол	0	0	пол	0	0	11
(Fe, Mn)S, 08кп	5	0	0	15	0	0	11	0	0	8
	25	0	0	25	0	0	17	0	0	14
MnO·SiO <sub>2</sub> , 08Ю	5	0	0	12	0	0	10	0	0	7
	15	0	0	16	0	0	15	0	0	10

Само по себе смещение реперных точек свидетельствует о взаимном смещении неметаллического включения и стальной матрицы. В то же время на границах включение-матрица нет признаков традиционного высокотемпературного проскальзывания. Очевидно, здесь следует говорить о, так называемом, холодном проскальзывании, механизм которого отличается от высокотемпературного проскальзывания вдоль межфазных границ включение-матрица [1, 2]. Тем более, что в отличие от высокотемпературного проскальзывания с повышением температуры деформации этот процесс проявляется сильнее, что выражается в увеличении показателя смещения риск, а при холодном проскальзывании с повышением температуры деформации величина угла смещения реперных точек, наоборот, уменьшается. Процесс холодного проскальзывания вдоль межфазных границ включение-матрица, очевидно происходит в результате пластического поворота или вращения включения в деформирующейся стальной матрице. Пластическая деформация стальной матрицы развивается неравномерно [1, 2], что способствует появлению зон локализованной деформации и возникновению градиентов напряжений, а также моментных напряжений при любой температуре и скорости деформации. Эти напряжения и вызывают пластический поворот или вращение (прокручивание) включения, но в тех случаях, когда в силу определенных условий деформации не успевает проходить их пластическая релаксация вблизи включения. При комнатной температуре при скоростях деформации  $V_1$ ,  $V_2$ , когда не наблюдается холодное проскальзывание, успевает проходить пластическая релаксация моментных напряжений в стальной матрице вблизи включений. При увеличении скорости деформации до  $V_3$  этот процесс, очевидно, не имеет достаточного времени для реализации и происходит «холодное» проскальзывание вдоль межфазных границ включение-матрица, которое можно рассматривать как вероятный механизм релаксации моментных напряжений вблизи включений. При 600 °С в стальной матрице реализуется слабое динамическое восстановление структуры, а при 900 °С – оно происходит активно, поэтому обсуждаемое явление хоть и проявляется, но в меньшей степени при 600 °С и еще в меньшей степени при 900 °С, чем при комнатной температуре (табл. 2). По-видимому, с повышением температуры возрастает активность пластической релаксации моментных напряжений в стальной матрице вблизи неметаллических включений. На рис. 1, в показаны зоны локальной релаксации напряжений в стальной матрице после

предварительного лазерного воздействия и деформации растяжением вблизи включения. В процессе деформации после предварительного лазерного воздействия вблизи включений образуются зоны локализованной деформации, содержащие заторможенные искривленные фрагментированные полосы сдвига, оборванные субграницы, микродвойники, вихревые образования, обусловленные ротационной локализацией и образованием дискретных разориентировок. Исследования показали, что в процессе пластической деформации после предварительного лазерного воздействия при скоростях перемещения захватов  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$  при всех исследованных температурах деформации не происходило смещение реперных точек, величина угла вращения (смещения)  $\alpha$  равна нулю. Взаимодействие между включениями и стальной матрицей в результате аномального массопереноса при лазерном воздействии, приведшее к упрочнению в результате микролегирования участков стальной матрицы вблизи включений, а также трансформации и упрочнению границ включение-матрица, способствует затрудненности пластической релаксации моментных напряжений и усилению адгезионных связей на межфазных границах при последующей деформации.

#### Научная новизна и практическая значимость

Установлено влияние лазерной обработки на различные виды проскальзывания, связанного с неметаллическими включениями, а именно – на «горячее» проскальзывание вдоль межфазных границ включение-матрица при высокотемпературной деформации и «холодное» проскальзывание неметаллических включений в стальной матрице при низкотемпературной деформации. Использование полученных результатов позволит разработать методы и режимы лазерной обработки, позволяющие влиять на характер пластического поведения межфазных границ включение-матрица при пластической деформации.

#### Выводы

Исследовано влияние лазерного воздействия на возможность «горячего» и «холодного» проскальзывания вдоль межфазных границ включение-матрица при различных температурах и скоростях деформации. Показано, что предварительное лазерное воздействие препятствует «холодному» проскальзыванию включений в стальной матрице и затрудняет «горячее» проскальзывание вдоль межфазных границ включение-матрица.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

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

2. Губенко С. И. Трансформация неметаллических включений в стали : монография / С.И. Губенко. - Москва: Металлургия, 1991. – 225 с.
3. Губенко С.И., Парусов В.В. Деформация металлических материалов. – Днепропетровск: АРТ-ПРЕСС, 2006. – 316с.
4. Леонтьев П.А. Лазерная поверхностная обработка металлов и сплавов : монография / Леонтьев П.А., Чеканов Н.Т., Хан М.Г. – Москва: Металлургия, 1986. – 142 с.
5. Денисенко О.І. 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. – Т.9. – № 4 (2008). –С. 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. – Т.9. – № 1 (2008). – С. 181-184.
7. Цоцко В.І. Температурні характеристики поверхностного слоя низкоуглеродистых сталей в условиях линейного нагрева поверхности./ Цоцко В.И., Денисенко А.И. // Вісник Дніпропетровського національного університету, 2004, №2: 72-
8. Цоцко В.И. Аналитическое моделирование поля температур одномерного образца в условиях местной термоциклирующей обработки / В.И. Цоцко, И.М. Спиридонова, Б.И. Пелешенко, А.И. Денисенко // Сучасні проблеми металургії. Наукові праці. – Том 10. – Дніпропетровськ: «Системні технології», 2007. – С. 170-178.
9. Цоцко В.И. Аналитическое моделирование температурного поля одномерного образца в условиях местной термообработки / В.И. Цоцко, И.М. Спиридонова, Б.И. Пелешенко, А.И. Денисенко // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 3 (56). – Том 2. – Дніпропетровськ, 2008. – С. 22-29.
10. Цоцко В.И. Нестационарное поле температур в металле в условиях импульсного энергетического воздействия / В.И. Цоцко, Б.И. Пелешенко, А.И. Денисенко // Сб. научн. тр.: Высокоэнергетическая обработка материалов. – Днепропетровск: АРТ-ПРЕСС, 2009. – С. 202-208.
11. Криштал М.А. Структура и свойства сплавов обработанных излучением лазера : монография / Криштал М.А., Жуков А.А., Кокора А.Н. – Москва: Металлургия, 1973. – 192 с.
12. Лазерная и электроннолучевая обработка материалов: справочник // Рыкалин Н.Н., Углов А.А., Зуев И.В., Кокора А.Н. – Москва: Машиностроение, 1985. – 496с
13. Упрочнение деталей лучом лазера: монография / Коваленко В.С., Головки Л.Ф., Меркулов Г.В., Стрижак А.И. – К.: Техника, 1981. – 131 с.

#### REFERENCES

1. Gubenko S. I., Parusov V. V., Derevianchenko I. V. *Nemetallicheskie vkluchenija v stali* [Non-metallic inclusions in steel]. Dnepropetrovsk, ART-PRESS Publ., 2005. 536p. (in Russian).
2. Gubenko S. I. *Transformatsija nemetallicheskih vkluchenij v stali* [Transformation of non-metallic inclusions in steel]. Moscow, Metallurgy Publ., 1991, 225p. (in Russian).
3. Губенко С.И., Парусов В.В. Деформация металлических материалов. – Днепропетровск: АРТ-ПРЕСС, 2006. – 316с.
4. Leontjev P.A., Chekanov N.T., Han M.G. *Lazernaja poverhnostnaja obrabotka metallov i splavov* [Laser surface treatment of metals and alloys]. Moscow, Metallurgy Publ., 1986. 142 p. (in Russian).
5. Denisenko A.I., Tsotsko V.I., Spiridonova I.M., Peleshenko B.G. Formuvannia polia temperature tonkoi strichki pid vplyvom na ii poverhnu dispersnoi fazi dvofaznogo strumenia [Formation of temperature field of the thin strip under the influence of the surface of the dispersed phase two-phase stream]. *Fizika i himija tverdogo tila - Physics and Chemistry of Solid State*, 2008, v. 9, N4, p. 901-904 (in Ukrainian)
6. Denisenko A.I., Tsotsko V.I., Spiridonova I.M., 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, v. 9, N1, p. 181-184 (in Ukrainian)
7. Tsotsko V.I., Denisenko A.I. Temperaturnie harakteristiki poverhnostnogo sloja nizkouglerodistih stalej v uslovijah lineinogo nagreva poverhnosti [Temperature characteristics of the surface layer of low-carbon steels in terms of a linear surface heating]. *Visnik Dnepropetrovskogo nacionalnogo universiteta – Messenger of Dnepropetrovst national university*. 2004, №2: 72-77. (in Russian).
8. Tsotsko V.I., Spiridonova I.M., Peleshenko B.G. Denisenko A.I. Analiticheskoe modelirovanie polja temperature odnomernogo obraztsa v uslovijah mestnoj termotsikliruushej obrabotki [Analytical modeling of temperature field in one-dimensional sample of the local thermo-cycling processing]. *Suchasni problem metalurgii. Naukovi pratsi - Modern problems of metallurgy. Proceedings. Dnepropetrovsk: Sistemnie Tehnologii*, 2007, v. 10, p. 170-178. (in Russian).
9. Tsotsko V.I., Spiridonova I.M., Peleshenko B.G. Denisenko A.I. Analiticheskoe modelirovanie polja temperature odnomernogo obraztsa v uslovijah mestnoj termotsikliruushej obrabotki [Analytical modeling of temperature field in one-dimensional sample of the local thermo-cycling processing]. *Siustemnie tehnologii - System technologies. Regional Interuniversity collection of scientific papers. Dnepropetrovsk*, 2008, issue 3 (56), v. 2, p. 22-29 (in Russian).
10. Tsotsko V.I., Peleshenko B.G. Denisenko A.I. Nestatsionarnoe pole temperature v metalle v uslovijah impulsnogo energeticheskogo vozdeistvija [Steady temperature field in the metal under the conditions of pulsed energy impact]. *Sb.nauch. trudov: Visokoenergeticheskaja obrabotka materialov – High-energy treatment of materials. Dnepropetrovsk, ART-PRESS*, 2009, P. 202-208. (in Russian).
11. Kryshtal M.A., Zhukov A.A., Kokora A.N. *Struktuta I svojstva cplavov obrabotannih izlucheniem lasera* [Structure and properties of alloys treating with laser beam]. Moscow, Metallurgy Publ., 1973. 192 p. (in Russian).
12. Rikalin N.N., Uglov A.A., Zuev I.V., Kokora A.N. *Lazernaja I elektronno-luchevaja obrabotka materialov* [Laser and electron-beam treatment of materials], Moscow, Machine building Publ., 1985. 496 p. (in Russian).
13. Kovalenko V.S., Golovko L.F., Merkulov G.V., Strizhak A.I. *Uprochnenie detalij luchom lazera* [Strengthening of parts with laser beam]. Kiev, Technics Publ., 1981. 131 p. (in Russian).

Статья рекомендована к публикации д-рами техн. наук, В.И. Большаковым и Д.В. Лаухиным (Украина)