

УДК 669:53.49

DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.241219.36.598

## ВЛИЯНИЕ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ НА ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ СТАЛЬНОЙ МАТРИЦЫ ПРИ ВЗРЫВНОМ НАГРУЖЕНИИ

ГУБЕНКО С. И., *д. т. н, проф.*

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

**Аннотация.** *Цель* работы – исследование локализации деформации вблизи включений в сталях с разным типом металлической матрицы и поведения самих включений при импульсном нагружении. *Методика.* Проводили динамическое нагружение образцов сталей Э3 и 08X18H10T по схеме метания тонкой пластины. Давление по расчету составляло 80...90 ГПа, скорость деформации  $100 \text{ с}^{-1}$ , время воздействия  $1,5 \cdot 10^{-6} \text{ с}$ . Исследования выполняли несколькими методами: металлографическим («Neophot-21»), электронномикроскопическим (JSM-35). *Результаты.* Исследованы особенности локальных изменений структуры стальной матрицы вблизи неметаллических включений при импульсном нагружении. Обсуждаются процессы локализации деформации вблизи включений в сталях с разным типом металлической матрицы и поведения самих включений при импульсном нагружении. Проанализировано влияние физических особенностей. Установлено, что напряжения, локализованные в стальной матрице вблизи включений, вызывают их разрушение. *Научная новизна.* Проведен анализ зон пластической релаксации в стальной матрице, позволивший утверждать об образовании областей с различной ориентировкой, что свидетельствует о сдвигово-поворотной переориентации этих зон релаксации напряжений вблизи включений в результате пластической деформации, имеющей волновую природу. Определены общие закономерности структурообразования и показано влияние типа кристаллической решетки матрицы сталей Э3 и 08X18H10T на развитие локализации деформационных процессов вблизи включений. *Практическая значимость.* Полученные результаты помогут разработать режимы импульсной обработки давлением, позволяющие влиять на формирование структуры вблизи неметаллических включений в сталях различного назначения.

*Ключевые слова:* сталь; неметаллические включения; взрывное нагружение; локализация деформации; напряжения

## ВПЛИВ НЕМЕТАЛЕВИХ ВКЛЮЧЕНЬ НА ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ СТАЛЕВОЇ МАТРИЦІ ЗА ВИБУХОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ

ГУБЕНКО С. І., *д. т. н, проф.*

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

**Анотація.** *Мета* – дослідження локалізації деформації поблизу включень у сталях із різним типом металевої матриці і поведінки самих включень за імпульсного навантаження. *Методика.* Проводили динамічне навантаження зразків сталей Е3 і 08Х18Н10Т за схемою метання тонкої пластини. Тиск за розрахунком становив 80...90 ГПа, швидкість деформації  $100 \text{ с}^{-1}$ , час впливу  $1,5 \cdot 10^{-6} \text{ с}$ . Дослідження виконували декількома методами: металографічним («Neophot-21»), електронномікроскопічним (JSM-35). *Результати.* Досліджено особливості локальних змін структури сталевій матриці поблизу неметалевих включень за імпульсного навантаження. Обговорюються процеси локалізації деформації поблизу включень у сталях із різним типом металевої матриці і поведінки самих включень за імпульсного навантаження. Проаналізовано вплив фізичних особливостей високошвидкісної деформації на формування структури сталей і процеси її локалізації поблизу включень. Установлено, що напруження, локалізовані в сталевій матриці поблизу включень, викликають їх руйнування. *Наукова новизна.* Проведено аналіз зон пластичної релаксації в сталевій матриці. Це дозволило стверджувати про утворення областей з різним орієнтуванням, що свідчить про зсувно-поворотну переорієнтацію цих зон релаксації напружень поблизу включень у результаті пластичної деформації, яка має хвильову природу. Визначено загальні закономірності структуроутворення та показано вплив типу кристалічної решітки матриці сталей Е3 і 08Х18Н10Т на розвиток локалізації деформаційних процесів поблизу включень. *Практична значимість.* Отримані результати допоможуть розробити режими імпульсної обробки тиском, що дозволить впливати на формування структури поблизу неметалевих включень у сталях різного призначення.

*Ключові слова:* сталь; неметалеві включення; вибухове навантаження; локалізація деформації; напруження

# INFLUENCE OF NON-METALLIC INCLUSIONS ON THE FORMATION OF THE STRUCTURE OF THE STEEL MATRIX IN EXPLOSIVE LOADING

GUBENKO S.I., *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*

Material Science Department, National Metallurgical Academy of Ukraine, 4, Haharina Av., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 374-83-57, e-mail: [sigubenko@gmail.com](mailto:sigubenko@gmail.com), ORCID ID: 0000-0001-0002-0003

**Abstract. Purpose.** The goal of this work was to study the localization of deformation near inclusions in steels with various types of metal matrix and the behavior of the inclusions themselves under pulsed loading. **Methodology.** Dynamic loading of the samples of steels E3 and 08H18N10T was carried out according to the scheme of throwing a thin plate. The calculated pressure was 80...90 GPa, strain rate  $100 \text{ s}^{-1}$ , exposure time  $1.5 \cdot 10^{-6} \text{ s}$ . The studies were carried out by several methods: metallographic ("Neophot-21"), electron microscopic (JSM-35). **Findings.** The features of local changes in the structure of the steel matrix near non-metallic inclusions under pulsed loading were studied. The processes of localization of deformation near inclusions in steels with various types of metal matrix and the behavior of the inclusions themselves under pulsed loading are discussed. The influence of the physical features of high-speed deformation on the formation of the structure of steels and the processes of its localization near inclusions were analyzed. It was established that stresses localized in a steel matrix near the inclusions cause their destruction. **Scientific novelty.** The analysis of plastic relaxation zones in a steel matrix was carried out, which made it possible to confirm the formation of regions with various orientations, which indicates a shear-rotational reorientation of these stress relaxation zones near inclusions as a result of plastic deformation having a wave nature. The general patterns of structure formation were determined and the influence of the crystal lattice type of the matrix of steels E3 and 08H18N10T on the development of localization of deformation processes near inclusions was shown. **Practical relevance.** Using the results obtained will allow us to develop pulsed pressure treatment regimes that allow you to influence the formation of the structure near non-metallic inclusions in various steels.

*Keywords:* steel; non-metallic inclusions; pulsed loading; localization of deformation; stresses

## Введение

Стальные изделия иногда подвергаются различным нетрадиционным обработкам, в частности, взрывному воздействию с целью получения метастабильных структур, обеспечивающих повышенный уровень физических, механических, функциональных характеристик [1–4]. Представляет интерес изучить роль неметаллических включений в протекании фазовых и структурных превращений в стальной матрице, а также исследовать изменения в самих включениях. Цель работы – исследование локализации деформации вблизи включений в сталях с разным типом металлической матрицы и поведения самих включений при импульсном нагружении.

## Материалы и методики

Проводили динамическое нагружение образцов сталей Э3 и 08Х18Н10Т по схеме метания тонкой пластины. Давление по расчету составляло 80...90 ГПа, скорость деформации  $100 \text{ с}^{-1}$ , время воздействия  $1,5 \cdot 10^{-6} \text{ с}$ . Исследования проводили несколькими методами: металлографическим («Neophot-21»), электронномикроскопическим (JSM-35).

## Результаты исследований и их обсуждение

При взрывной обработке ударные волны создают высокие напряжения, которые локализуются в узком фронте распространения волн и вызывают высокоскоростную пластическую деформацию. Пластические акты осуществляются не в однородном

поле напряжений, а при концентрациях напряжений, в том числе и вблизи включений. Концентрации напряжений непрерывно возникают и релаксируют, создавая сильно возбужденные состояния в локальных объемах стальной матрицы вблизи включений [5–7]. Распространяющиеся в образце ударные волны при встрече с включениями, имеющими волновые импедансы, отличные от таковых для матрицы, вызывают импульсы соударения.

Особенностями высокоскоростной (импульсной) деформации, отличающими ее от квазистатической деформации, являются резкое увеличение числа источников дислокаций и систем скольжения, возрастание скорости движения дислокаций, образование сверхзвуковых дислокаций, что все вместе приводит к резкому увеличению плотности дислокаций в металле [1; 8; 9]. По-видимому, регенеративные источники дислокаций при взрывном воздействии малоэффективны из-за своей инертности. Гомогенные источники дислокаций во фронте ударной волны не получили экспериментального подтверждения, поэтому наиболее вероятны гетерогенные источники дислокаций, например, связанные с включениями.

При движении дислокаций с высокой скоростью развито неконсервативное движение порогов дислокаций, что способствует образованию большого количества точечных дефектов [1], в свою очередь образующих при миграции на дислокациях ступеньки и призматические петли. При импульсном нагружении реализуются условия для создания самосогласованной системы потенциальных

барьеров, приводящих к эффекту самоорганизации групп атомов и коллективному смещению их из положения равновесия.

В процессе нагружения в стали распространяются волны пластической деформации, причем в системе существует спектр таких волн, характеризующийся различными значениями длин волн. Каждый тип волн вовлекает в деформацию определенный структурный уровень деформации, весь же спектр волн пластической деформации определяет иерархию структурных уровней деформации в системе. Для взрыва применим релаксационный подход, в основе которого лежит зарождение пластической деформации при критических напряжениях. Пластическая деформация рассматривается как суперпозиция различных релаксационных механизмов [10], а включения в стали можно представить как набор релаксаторов. Область всестороннего сжатия распадается на зоны с релаксированными напряжениями.

В работе [11] обнаружено, что в упруго-пластических волнах, распространяющихся в ударно нагружаемом материале, в результате его пространственной неоднородности возникает новый некристаллографический уровень деформации, который проявляется в виде потоков частиц среды, движущихся в направлении распространения волны и обладающих конечной дисторсией скоростей движения относительно друг друга. Распределение этих потоков по скоростям зависит от степени неоднородности материала, температуры, времени нагружения, его интенсивности. На границах потоков происходят сдвиги соседних участков материала. При ударно-волновом нагружении движение потоков внутри зерен представляет собой новый, более крупномасштабный, по сравнению с дислокационным, уровень динамического деформирования.

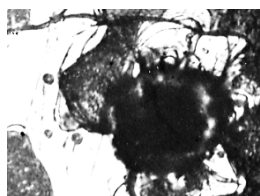
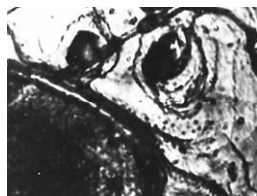
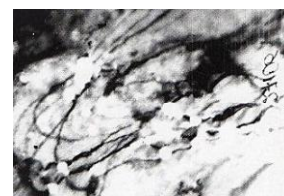
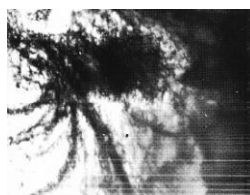
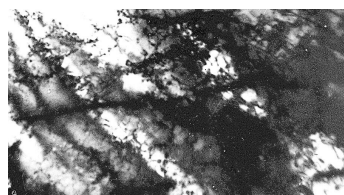
Высокоскоростная деформация в матрице вблизи включений реализуется в виде релаксационных волн, имеющих сдвиговую и ротационную компоненты. Вблизи включений, размеры которых 20...25 мкм, зоны пластической деформации имеют

специфический лепестковый характер (рис. 1 *a*), свидетельствующий о нескольких центрах релаксационных процессов вдоль межфазной границы включение – матрица. Для более мелких включений характерно наличие зон пластической деформации в виде концентрических окружностей (рис. 1 *б*). В скоплениях включений зоны пластической деформации имеют более сложную конфигурацию (рис. 1 *в*).

Ударные волны при встрече с включениями порождают импульсы соударения, генерируемые этими процессами волны напряжений при наложении образуют суперпозицию импульсов. Импульсы в стальной матрице генерируются независимо дислокационно-дисклинационными процессами, границами зерен, субграницами, границами включение – матрица. Релаксационные процессы вблизи включений осуществляются путем последовательных сбросов напряжений в результате испускания дефектов – дислокаций и дисклинаций.

Релаксационные сдвиги вследствие неизотропности трансляционных потоков неизбежно порождают поле поворотных моментов. Высокочастотные колебания включений и зерен матрицы в ударных волнах служат причиной возникновения турбулентного пластического течения (рис. 1 *г*, *д*). Потоки дефектов формируют новые источники силовых полей, релаксация которых пластическим сдвигом приводит к возникновению нового поля поворотных моментов.

После мгновенной разгрузки образца в нем начинаются осцилляции дислокационного континуума, вблизи включений происходят пульсации дислокационно-дисклинационной деформации, которые ослабевают и постепенно затухают. Анализ характера зон пластической релаксации в зернах матрицы стали ЭЗ позволяет утверждать об образовании областей с различной ориентировкой, свидетельствующих о сдвигово-поворотной переориентации этих зон релаксации напряжений вблизи включений в результате пластической деформации.

*a**б(б)**в(с)**г(д)**д(е)**е(г)**ж(н)**з(и)*

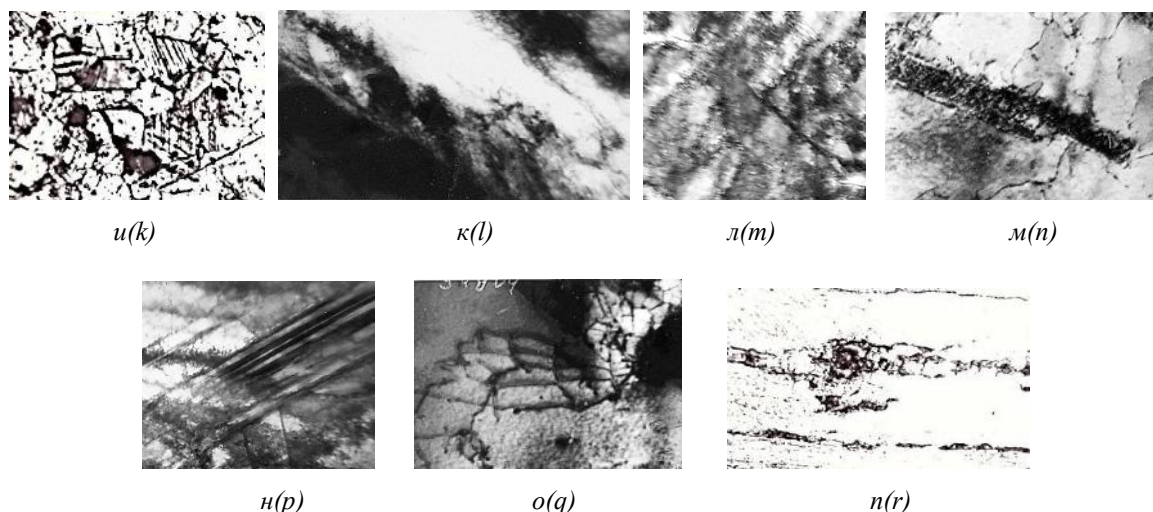


Рис. 1. Микроструктура сталей Э3 и 08X18H10T вблизи включений после взрывного воздействия: а(а) – в(в) –  $\times 800$ , ж(ж) – u(k), n(r) –  $\times 500$ , з(д) – e(г), κ(l), м(n) – o(к) –  $\times 30\,000$  / Fig. 1. The microstructure of steels E3 and 08X18H10T near inclusions after explosive action: a(a) – в(в) –  $\times 800$ , ж(ж) – u(k), n(r) –  $\times 500$ , з(д) – e(г), κ(l), м(n) – o(к) –  $\times 30\,000$

Изучение тонкой структуры вблизи включений выявило дислокационные скопления, элементы ячеистой субструктуры (рис. 1 e). Изучение общей картины структуры сталей после взрывного нагружения показало, что включения находятся в металлической матрице, которая претерпела скоростную деформацию скольжением и двойникованием. Вблизи включений наблюдали зоны локализованной деформации (рис. 1 ж–к). Нагружение ударными волнами приводит к получению сложной микроструктуры вблизи включений. Происходит перестройка в системе зеренной структуры металла, связанная не только с удлинением зерен за счет «холодного» взрывного воздействия. Наличие вихревых зон свидетельствует о реализации ротационной деформации, охватывающей достаточно большое количество зерен в этих участках.

Очевидно, на границах волновых потоков вблизи включений возникают моментные напряжения, приводящие к неоднородному распределению напряжений и деформаций на микроуровне, что способствует вихревому «закручиванию» систем деформированных зерен. При ударно-волновом нагружении движение потоков вблизи включений представляет собой более крупномасштабный, по сравнению с дислокационным, уровень динамического деформирования.

Исследование микроструктуры матрицы стали Э3 с ОЦК решеткой и стали 08X18H10T с ГЦК-решеткой показало, что закономерности формирования структуры вблизи включений в них во многом аналогичны и включают пластические сдвиги и повороты, свойственные сильно деформированному состоянию, когда возникают коллективные формы движения в ансамблях сильновзаимодействующих дислокаций. При этом в

областях, охваченных фрагментированной или ячеистой структурой, проявляются крупномасштабные неоднородности кристаллографической ориентации («ножевые» границы), вызывающие значительные разориентировки (рис. 1 e).

Сталь с включениями представляет собой систему, в которой на основании теории релаксационного подхода включения могут рассматриваться как набор релаксаторов, срабатывающих по мере достижения на них определенного напряжения. Область всестороннего сжатия при импульсном нагружении распадается на зоны с релаксированными напряжениями. Вблизи включений образуются неравновесные структуры с высокой зарядовой плотностью дислокаций (рис. 1 л).

Различие в характере релаксационных процессов, протекающих в металлической матрице вблизи включений, связано с типом кристаллической решетки стальной матрицы. Это обуславливает разную энергию дефекта упаковки, аномально большую подвижность краевых компонент дислокационных петель в ОЦК-металлах и преимущественное скольжение дислокаций по октаэдрическим системам в ГЦК-металлах, различие формы и поведения дислокационных петель, разное поведение двойникующих дислокаций в ОЦК и ГЦК-материалах [12–14].

В исследованных сталях наблюдается различие в механизмах двойникования и образования дефектов упаковки, что обусловило различие морфологии двойников и разный результат от процесса образования дефектов упаковки: преддвойниковое состояние в стали Э3 (рис. 1 м) и образование ε-мартенсита в стали 08X18H10T (рис. 1 н). Различие проявлялось и в поведении дислокаций и границ зерен – их аномальное

расщепление в стали ЭЗ (рис. 1 о) и традиционное в стали 08Х18Н10Т.

Поведение самих включений определяется степенью их пластичности в условиях сложной системы динамических напряжений: недеформируемые включения оксидов, силикатов разрушаются (рис. 1 н), пластичные сульфиды деформируются. Однако, по сравнению с обычной деформацией, в условиях высокоскоростного деформирования уровень пластичности сульфидов проявляется слабее и нередко они разрушаются в результате взрывного воздействия.

Для высокоскоростного нагружения характерно накопление большого количества энергии деформации [2], часть которой расходуется на разогрев металлической матрицы, и это приводит к локальной рекристаллизации. Для высокоскоростной рекристаллизации характерны повышенная

плотность дефектов кристаллического строения (плотность дислокаций  $10^{10...11} \text{ см}^{-2}$ ), а также наличие слаборекристаллизованных участков, особенно вблизи неметаллических включений.

### Выводы

Проанализированы особенности локальных изменений структуры стальной матрицы вблизи неметаллических включений при импульсном нагружении. Определены общие закономерности структурообразования и показано влияние типа кристаллической решетки на развитие локализации деформационных процессов вблизи включений. Установлено, что напряжения, локализованные в стальной матрице вблизи включений, вызывают их разрушение.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Эпштейн Г. Н. Строение металлов, деформированных взрывом : монография / Г. Н. Эпштейн. – Москва : Metallurgy, 1988. – 280 с.
2. Ушеренко С. М. Изменение структуры железа и стали при сверхглубоком внедрении высокоскоростных частиц / С. М. Ушеренко, С. И. Губенко, В. Ф. Ноздрин // Известия АН СССР. Металлы. – 1991. – № 1. – С. 124–125.
3. Usherenko S. M. Motion and deceleration of explosively accelerated solid particles in a metallic target / S. M. Usherenko, V. F. Nozdrin, S. I. Gubenko, G. S. Romanov // International journal of heat and mass transfer. – 1994. – № 37 (15). – Pp. 2367–2375.
4. Соболев В. В. Физический механизм сверхглубокого проникания микрочастиц в твердые среды / В. В. Соболев, С. М. Ушеренко, С. И. Губенко // Науковий вісник НГАУ. – 1998. – № 3. – С. 62–65.
5. Структурные уровни деформации твердых тел : монография / [В. Е. Панин, В. А. Лихачев, Ю. В. Гриняев]. – Новосибирск : Наука, 1985. – 229 с.
6. Ушеренко С. М. Изменение структуры металлической мишени при высокоскоростном внедрении дисперсных частиц / С. М. Ушеренко, С. И. Губенко, В. Ф. Ноздрин // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1991. – № 6. – С. 34–36.
7. Ушеренко С. М. Дальнедействующие поля напряжений вблизи дисперсных частиц, возникающие при взрывном легировании металлических материалов / С. М. Ушеренко, С. И. Губенко, В. Ф. Ноздрин // Металлофизика. – 1991. – Т. 13. – № 7. – С. 57–64.
8. Nozdrin V. F. Mechanism of hardening metals in superdeep penetration of high-speed particles / V. F. Nozdrin, S. M. Usherenko, S. I. Gybenko // Physics and chemistry of materials treatment. – 1991. – № 6. – Pp. 19–24.
9. Usherenko S. M. Structural changes during the bulk doping of nuclear stainless steel / S. M. Usherenko, S. I. Gybenko, V. V. Sobolev // EUROMAT-96. Conference on materials and Nuclear Power. Bournemouth, UK, – 1996. – Pp. 315–321.
10. Панин В. Е. Волновая природа пластической деформации твердых тел / В. Е. Панин // Известия вузов. Физика. – 1990. – Т. 33. – № 2. – С. 4–18.
11. Некристаллографические структурные уровни деформации в сильновозбужденных системах / В. Е. Панин, Ю. И. Мещеряков, Т. Ф. Елсукова, А. К. Диваков // Известия вузов. Физика. – 1990. – № 2. – С. 107–120.
12. Губенко С. И. Неметаллические включения и пластичность сталей. Физические основы пластичности сталей // Saarbrücken : LAP LAMBERT. Palmarium academic publishing. – 2016. – 549 с.
13. Губенко С. И. Поведение неметаллических включений при высокоскоростной деформации в условиях взрывного воздействия / С. И. Губенко // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1989. – № 1. – С. 40–41.
14. Губенко С. И. Волны деформации вблизи неметаллических включений в условиях взрывного воздействия / С. И. Губенко // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1992. – № 7. – С. 32–33.

### REFERENCES

1. Epstein G.N. *Stroyeniye metallov, deformirovannykh vzryvom* [The structure of metals deformed by the explosion]. Moscow : Metallurgy, 1988, 280 p. (in Russian).
2. Usherenko S.M., Gubenko S.I. and Nozdrin V.F. *Izmeneniye strukturi zheleza i stali pri sverhglubokom vnedrenii visokoskorostnykh chastits* [Changes in the structure of iron and steel with ultra-deep introduction of high-speed particles]. *Metalli* [Metals]. 1991, no. 1, pp. 124–125. (in Russian).
3. Usherenko S.M., Nozdrin V.F., Gubenko S.I. and Romanov G.S. Motion and deceleration of explosively accelerated solid particles in a metallic target. *International journal of heat and mass transfer*. 1994, no. 37 (15), pp. 2367–2375.
4. Sobolev V.V., Usherenko S.M. and Gubenko S.I. *Fizicheskiy mekhanizm sverhglubokogo pronikaniya mikrochastits v tverdyye sredy* [The physical mechanism of superdeep penetration of microparticles into solid media]. *Nauchnyy vestnik NKAU* [Scientific Bulletin of NSAU]. 1998, no. 3, pp. 62–65. (in Russian).

5. Panin V.E., Likhachev V.A. and Grinyaev Yu.V. *Strukturnyye urovni deformatsii tverdykh tel* [Structural levels of deformation of solids]. Novosibirsk : Nauka, 1985, 229 p. (in Russian).
6. Usherenko S.M., Gubenko S.I. and Nozdrin V.F. *Izmeneniye struktury metallicheskoj misheni pri vysokoskorostnom vnedrenii dispersnykh chastits* [Change in the structure of a metal target during high-speed penetration of dispersed particles]. *Metallurgiya i termicheskaya obrabotka metallov* [Metallurgy and heat treatment of metals]. 1991, no. 6, pp. 34–36. (in Russian).
7. Usherenko S.M., Gubenko S.I. and Nozdrin V.F. *Dal'nodeystvuyushchiye polya napryazheniy vblizi dispersnykh chastits, voznikayushchiye pri vzryvnom legirovanii metallicheskih materialov* [Long-range stress fields near dispersed particles arising from explosive alloying of metallic materials. Metallophysics]. 1991, vol. 13, no. 7, pp. 57–64. (in Russian).
8. Nozdrin V.F., Usherenko S.M. and Gubenko S.I. Mechanism of hardening metals in superdeep penetration of high-speed particles. *Physics and chemistry of materials treatment*. 1991, no 6, p. 19–24.
9. Usherenko S.M., Gubenko S.I. and Sobolev V.V. Structural changes during the bulk doping of nuclear stainless steel. EUROMAT-96. Conference on materials and Nuclear Power. Bournemouth, UK, 1996, pp. 315–321.
10. Panin V.E. *Volnovaya pripoda plasdtichekoj deformatsii tverdih tel* [The wave nature of plastic deformation of solids]. *Izvestiya vuzov. Fizika* [Izv. universities. Physics]. 1990, no. 2, pp.4–18. (in Russian).
11. Panin V.E., Meshcherjakov Yu.I., Yelsukova T.F. and Divakov A.K. *Necrystallograficheskie structurnie urovni deformatsii i silnovozbuzhdennih sistemah* [Non-crystallographic structural levels of deformation in highly excited systems]. *Izvestiya vuzov. Fizika* [University News. Physics]. 1990, no 2, pp.107–120. (in Russian).
12. Gubenko S.I. *Nemetallicheskiye vklyucheniya i plastichnost' staley* [Non-metallic inclusions and ductility of steels. The physical basis of the ductility of steels]. Saarbrücken : LAP LAMBERT. Palmarium academic publishing, 2016, 549 p. (in Russian).
13. Gubenko S.I. *Povedeniye nemetallicheskih vklyucheniy pri vysokoskorostnoy deformatsii v usloviyakh vzryvnogo vozdeystviya* [The behavior of non-metallic inclusions during high-speed deformation in explosive conditions]. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov* [Metallurgy and heat treatment of metals]. 1989, no. 1, pp. 40–41. (in Russian).
14. Gubenko S.I. *Volny deformatsii vblizi nemetallicheskih vklyucheniy v usloviyakh vzryvnogo vozdeystviya* [Deformation waves near non-metallic inclusions in explosive conditions]. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov* [Metallurgy and heat treatment of metals]. 1992, no. 7, pp. 32–33. (in Russian).

Поступила в редакцию 10.11.2019.