

УДК 539.4.014.3

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЗРЫВА НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТАЛИ 110Г13Л

А. В. Гуськов, К. М. Зубашевский, К. Е. Милевский, В. В. Самойленко

Новосибирский государственный технический университет, 630073 Новосибирск, a.guskov@corp.nstu.ru

Ударно-волновое нагружение является одним из эффективных методов объемного упрочнения материала. Проведенное исследование структуры и механических свойств стали 110Г13Л до и после ее взрывного нагружения показало, что механические характеристики достигают наибольшего значения у поверхности обработанного взрывом материала и составляют: твердость — 480 HV, предел текучести — 850 МПа, предел прочности — 1240 МПа. Толщина упрочненного слоя ≈ 40 мм. Для стали без ударно-волнового нагружения перечисленные параметры имели значения 240 HV, 355 МПа и 840 МПа соответственно. Металлографические исследования выявили, что с удалением от поверхности взрывного воздействия уменьшается количество линий скольжения в зернах.

Ключевые слова: сталь Гадфильда, ударно-волновое нагружение, твердость, прочность, линии скольжения.

DOI 10.15372/FGV20190617

ВВЕДЕНИЕ

Сталь 110Г13Л (сталь Гадфильда) обладает уникальной восприимчивостью к деформационным методам упрочнения, таким как прокатка, прессование, ковка. При перечисленных способах обработки деформация металла прямо пропорциональна степени упрочнения, однако упрочнение происходит на малую глубину, реализуется не весь потенциал механических свойств материала для упрочнения, геометрия изделия значительно изменяется [1].

Существует вид обработки, который увеличивает глубину упрочнения при малых деформациях. Это способ ударно-волнового нагружения, который предложен в работе [2]. Дальнейшее развитие этого способа позволило определить [3, 4], что толщина слоя упрочненного материала может достигать 40 мм при относительно малой деформации материала, около 5 %. Кроме того, после нагружения взрывом потери от доводочной механической обработки составляют $6 \div 8$ % от толщины упрочненного слоя материала, в отличие от методов обработки давлением ковкой и накаткой, где потери $50 \div 60$ %.

На данный момент активно ведутся исследования, направленные на упрочнение взрывом стрелочных переводов в связи с развитием

железнодорожного транспорта [5–9]. В работах [10, 11] исследовались структура и свойства стали Гадфильда в зависимости от толщины взрывчатого материала и количества ударно-волновых нагружений. Установлено, что толщина упрочненного слоя материала после трехкратного нагружения составляет 30 мм, в случае однократного воздействия — 20 мм. Кроме того, показано, что с увеличением толщины слоя взрывчатого вещества увеличивается толщина упрочненной зоны материала.

Полученная после ударно-волнового нагружения толщина упрочненного слоя определяет необходимость изучения однородности распределения механических свойств материала по толщине слоя, с тем чтобы эффективнее использовать данный слой [12].

В настоящей работе рассмотрено влияние ударно-волнового нагружения на распределение физико-механических свойств материала 110Г13Л в зависимости от удаления от поверхности нагружения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве исследуемого материала выбрана термически упрочненная сталь 110Г13Л, содержащая $0.9 \div 1.5$ % углерода, $0.3 \div 1.0$ % кремния, $11.5 \div 15.0$ % марганца, не более 1.0 % хрома и никеля, не более 0.05 % серы и 0.12 % фосфора [13].

Физико-механические свойства материала исследовались как в исходном состоянии, так и после обработки взрывом.

В качестве взрывчатого вещества (ВВ) для создания ударно-волновой нагрузки использовалось пластическое взрывчатое вещество ЛВВ11-01, характеризующееся скоростью детонации 7400 м/с при плотности вещества 1.42 г/см³. Заряд ВВ представляет собой ленту, подрываемую с помощью электродетонатора. Толщина слоя ВВ 12 мм. ВВ фиксировалось на поверхности упрочняемого материала клеем БФ-4.

Использование пластического ВВ обусловлено тем, что оно способно с высокой точностью копировать поверхность упрочняемого изделия, обеспечивать плотное беззазорное прилегание к поверхности образца. Плотное прилегание необходимо для исключения воздушных полостей между ВВ и поверхностью исследуемого материала, приводящих к неравномерному нагружению материала и искажению условий проведения эксперимента.

Схема нагружения (рис. 1,а) представляет собой схему всестороннего сжатия, которая позволяет уменьшить деформацию материала и тем самым избежать образования наплывов материала (рис. 1,б). Кроме того, такое положение ВВ дает возможность концентрировать ударные волны и направлять их по нормали к поверхности нагружения.

Было изготовлено две группы образцов, в каждой по три заготовки в форме клиновидных брусков. Одна группа заготовок подвергалась обработке взрывом, вторая служила контрольными образцами для сравнения результатов эксперимента с исходными данными. Заготовки разрезали по схеме раскроя, приведенной на рис. 2, на образцы для проведения ряда

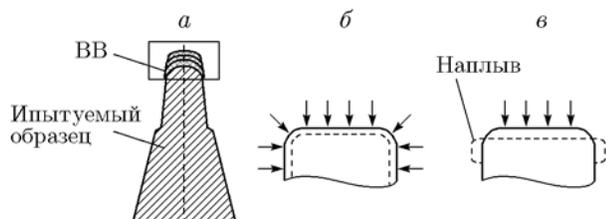


Рис. 1. Схема расположения взрывчатого вещества на заготовке:

а — схема нагружения ВВ, б — схема всестороннего нагружения, в — схема одностороннего нагружения

исследований: определение распределения твердости и микротвердости по толщине упрочненного материала, исследование структуры материала методом оптической металлографии, определение уровня прочностных свойств в условиях статического растяжения. Для резки выбран гидроабразивный способ, реализуемый при низкой температуре, что минимизирует влияние резки на физико-механические свойства образцов.

Для измерения твердости использовался плоский трапециевидный образец с подготовленной поверхностью, как на рис. 1,а. Твердость определялась методом Роквелла. Измерение твердости проводилось по трем направлениям (дорожкам), расположенным на расстоянии 5 мм друг от друга (рис. 3) [14]. Твердость материала измеряли твердомером ТК-2М.

Для измерения микротвердости образец разрезали на пять частей, каждую нумеровали А1–А5 в соответствии с рис. 2. Микротвердость измерялась по Виккерсу путем вдавливания в испытуемый образец алмазной пирамиды стандартных размеров. Интервал между отпечатками пирамиды составлял 250 мкм. Дорожка отпечатков наносилась перпендикулярно к поверхности нагружения.

Металлографические исследования выполнялись по схеме рис. 1,б на участках А1–А5. Использовался микроскоп Axiovert 25 СА фирмы «Zeiss» [15, 16].

Определение стандартных механических характеристик при статическом растяже-

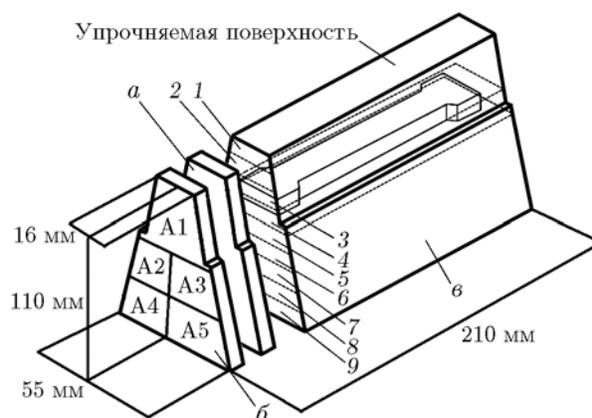


Рис. 2. Схема раскроя заготовки на образцы:

а — измерение твердости, б — изготовление шлифов для проведения металлографических исследований, в — изготовление образцов на растяжение и измерение плотности

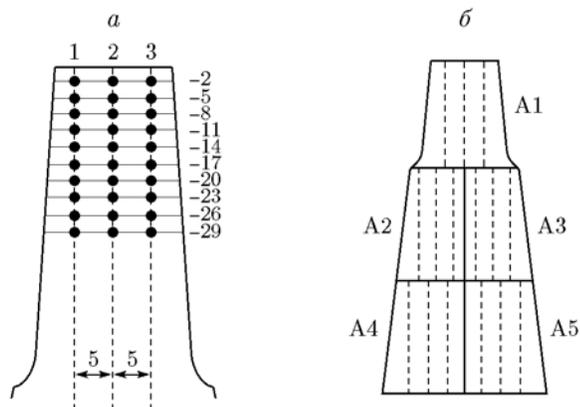


Рис. 3. Схема замера твердости и микротвердости:

a — направление и шаги замеров твердости по глубине технологической пробы, мм; *b* — направление дорожек для измерения микротвердости

нии проводилось на плоских образцах по ГОСТ 1497-84 [12] с использованием испытательной машины Instron 3369. Скорость перемещения траверсы составила 10 мм/мин.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты измерения твердости методом Роквелла (HRC) показали, что на расстоянии $h \approx 3$ мм от поверхности приложения нагрузки твердость значительно увеличилась — с 20 до 40 HRC по сравнению с ненагруженными образцами, что сопоставимо с данными, приведенными в работах [6, 17, 18]. Зависимость распределения значений твердости от расстояния до поверхности нагружения имеет прямо пропорциональный убывающий характер. На рис. 4 представлено распределение твердости по образцу в зависимости от расстояния от поверхности упрочнения. Твердость на расстоянии более 30 мм от поверхности нагружения постоянна.

С целью более детального исследования этой зависимости проводился дополнительный эксперимент с применением более точного оборудования и изменением шага измерения. Для этого использовался метод измерения микротвердости по Виккерсу (HV), который позволяет увеличить количество шагов при одновременном уменьшении интервала между ними на участке, аналогичном используемому при определении твердости методом Роквелла. Установлено, что микротвердость возросла примерно в два раза, т. е. с 240 до 480 HV. Распреде-

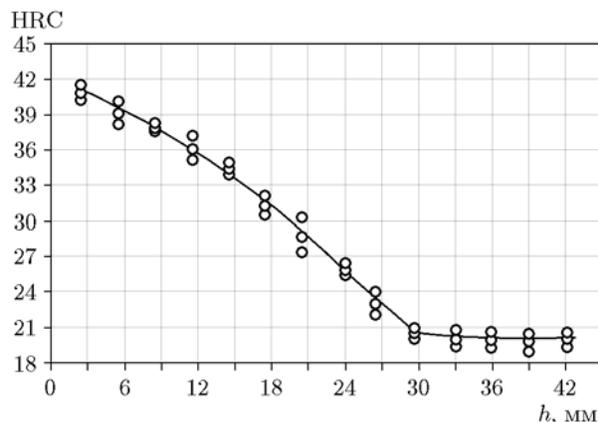


Рис. 4. Зависимость твердости образца от расстояния от упрочняемой поверхности

ние микротвердости HV имеет вид, подобный распределению HRC (см. рис. 4): линейное снижение твердости при удалении от поверхности нагружения. Следует отметить, что аналогичные значения твердости наблюдались в работе [19], но они были достигнуты за счет трехкратной обработки взрывом. Кроме того, близкие значения HV для слоя, упрочненного взрывом, получены также и в работе [8]. Однако в работе [9] твердость упрочненного слоя оказалась значительно ниже (≈ 380 HV), что предположительно связано с меньшей толщиной наносимого ВВ — 3 мм, в то время как в данной работе толщина 12 мм.

В исследуемой зависимости можно выделить несколько участков (рис. 5), имеющих отличное от линейного поведение. С удалением от упрочняемой поверхности микротвердость ступенчатым образом уменьшается до расстояния 38 ÷ 40 мм, где составляет 250 HV, что совпадает с микротвердостью исходных образцов без ударно-волнового нагружения.

На рис. 5 зависимость распределения микротвердости от расстояния от поверхности упрочнения имеет ступенчатый вид, эту кривую можно условно разделить на шесть участков. На участках 1, 3, 5 микротвердость уменьшается пропорционально удалению от поверхности нагружения до глубины 4, 22, 40 мм. На участках 2, 4, 6 значения микротвердости постоянны до глубины 14, 32 мм и далее от 38 мм. Участок 1 воспринимает прямое воздействие ударной волны, и на его поверхности формируются дефекты в виде каверн и микротрещин.

В работе [10] максимальная глубина упрочнения стали Гадфильда при взрывном

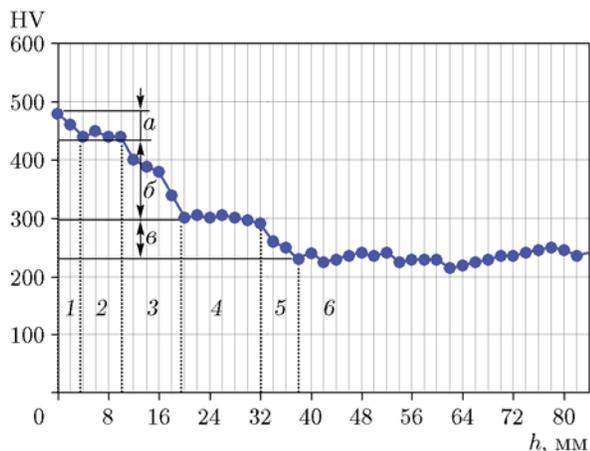


Рис. 5. Зависимость микротвердости образца от расстояния от упрочняемой поверхности:
1–6 — участки материала с однородным распределением микротвердости

упрочнении составляла 30 мм. В настоящей работе достигнута глубина упрочнения 40 мм, т. е. на 30 % больше.

Результаты металлографического исследования выявили, что деформация зерен в упрочненном слое материала после ударно-волнового нагружения составляет 5 ÷ 6 %. В микроструктуре материала регистрируются линии скольжения, параллельные друг другу и располагающиеся в границах аустенитных зерен (рис. 6) [20].

На образце А1 (на расстоянии 0 ÷ 30 мм от поверхности нагружения) ориентация линий скольжения составляет 180°, т. е. параллельно

поверхности нагружения в отдельных зернах наблюдаются линии скольжения, перпендикулярные поверхности нагружения.

Методом секущей определялась плотность упаковки линий скольжения. Для этой цели перпендикулярно линиям скольжения проводился отрезок длиной 100 мкм и регистрировалось количество попавших на отрезок линий скольжения. Для образца А1 среднее количество попавших линий составило 26. У образцов А2 и А3 в микроструктуре стали видны линии скольжения, преимущественная ориентация которых близка к углу 45°. Их количество в среднем равно 13. У образцов А4 и А5, в отличие от образцов А1–А3, не наблюдается четкой ориентации линий скольжения в зерне. Количество линий скольжения составляет 12. Значения твердости, количество линий скольжения, углы наклона линий скольжения представлены в таблице.

Определение механических свойств стали при растяжении показало, что на глубине упрочненного слоя материала 4 ÷ 10 мм после ударно-волнового нагружения условный предел текучести увеличился в 2 ÷ 2.5 раза. На глубине 40 ÷ 50 мм предел текучести увеличился в 1.5 ÷ 1.75 раза. На образцах, вырезанных с участка 2 (4 ÷ 10 мм от поверхности нагружения, см. рис. 5), условный предел текучести составляет $\sigma_T = 850$ МПа, с участка 4 (20 ÷ 32 мм) — $\sigma_T = 700$ МПа (рис. 7).

Предел прочности образцов, вырезанных с участка 2 (4 ÷ 10 мм, см. рис. 5), составляет $\sigma_{пр} = 1240$ МПа (в 1.5 раза выше, чем у исходного образца), на участке 4 (20 ÷ 32 мм) — $\sigma_{пр} = 1050$ МПа, результаты представлены на рис. 8.

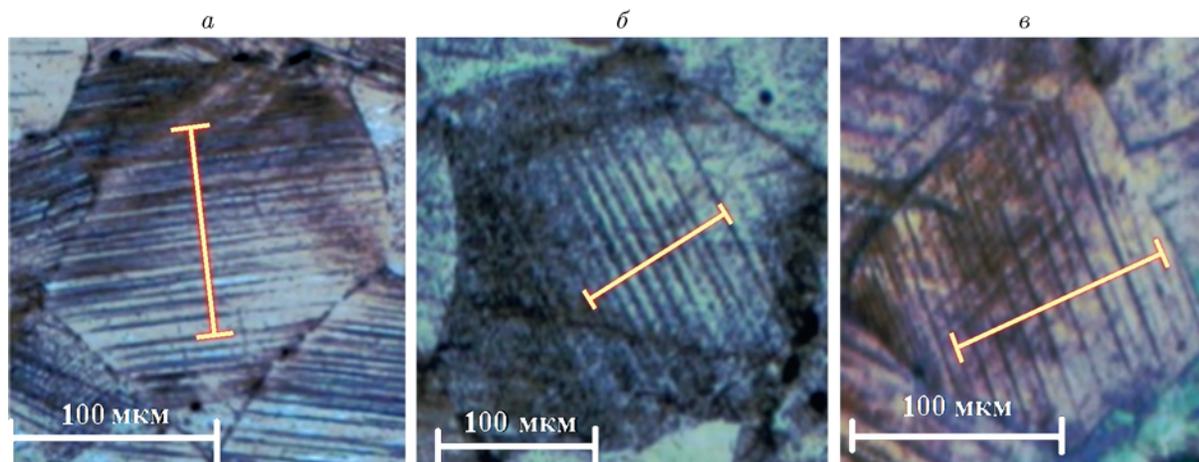


Рис. 6. Микроструктура зерна образцов А1 (а), А2 (б), А4 (в)

Твердость, количество линий скольжения, углы наклона в поперечном направлении

Зона (рис. 3,б)	Твердость	Количество линий скольжения на 100 мкм	Преимущественный угол наклона, град
A1	450 HV	26	≈ 0.90
A2, A3	300 HV	13	≈ 45.135
A4, A5	250 HV	12	Разориентация

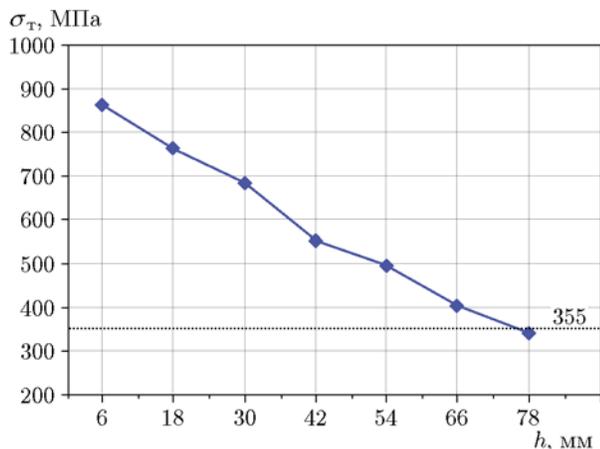


Рис. 7. Распределение предела текучести по глубине образца (355 МПа — предел текучести по [11])

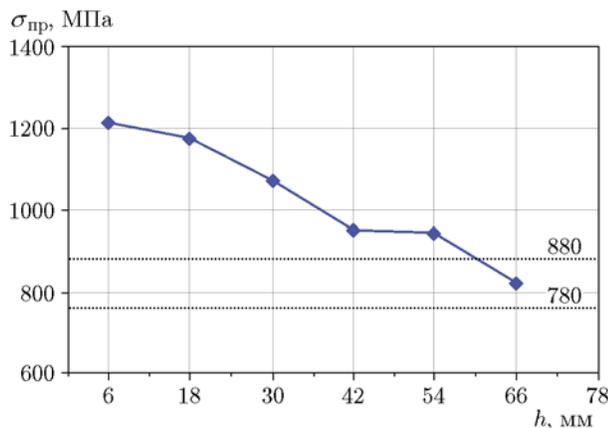


Рис. 8. Распределение предела прочности по глубине образца (780 ÷ 880 МПа — предел прочности по [11])

Зафиксировано, что после нагружения взрывом происходит увеличение пределов текучести и прочности в 2 ÷ 2.5 раза на участке 2 (4 ÷ 10 мм). На участке 4 (20 ÷ 32 мм) данный показатель увеличился в 1.5 раза. В работе [21] значение предела текучести, получен-

ное для аналогичных стали и схемы нагружения, составило ≈ 900 МПа, что объясняется, по видимому, меньшей толщиной ВВ (3 мм).

Пределы текучести и прочности образца имеют прямо пропорциональный убывающий характер при удалении от поверхности нагружения на 40 мм. Вышеуказанные свойства уменьшаются в 1.3 ÷ 1.5 раза. Результаты измерения микротвердости коррелируют с результатами прочностных испытаний до указанной глубины. При переходе в область 40 ÷ 60 мм прочностные характеристики материала совпадают с характеристиками материала в состоянии поставки.

ВЫВОДЫ

Использование энергии взрывчатого вещества, предварительно нанесенного на поверхность клиновидных заготовок из высокомарганцевистой стали 110Г13Л, позволяет эффективно упрочнять материал на глубину до 40 мм. Изменение показателей твердости с ростом расстояния от поверхности нагружения имеет преимущественно пропорциональный характер. Однако при определении показателей микротвердости с уменьшением шага измерения выделены отдельные участки, на которых либо происходит линейное изменение микротвердости HV, либо она остается постоянной. При этом общий уровень микротвердости при удалении от поверхности воздействия снижается в два раза — с 480 до 240 HV. Наличие участков с различной микротвердостью дает возможность условно разделить обработанный взрывом материал на слои с различными механическими свойствами, что также подтверждается результатами оптической микроскопии.

Металлографические исследования выявили образование линий скольжения в упроченном материале, причем с ростом расстояния от поверхности нагружения меняется плотность их упаковки, а также их направление, кото-

рое соответствует направлению действия главных касательных напряжений. На расстоянии до 40 мм линии скольжения направлены параллельно поверхности нагружения и их среднее количество в области размером 100 мкм составляет 26. При дальнейшем удалении от поверхности нагружения направление линий меняется, и на глубине 90 ÷ 100 мм оно становится хаотичным. Кроме того, и плотность упаковки линий скольжения уменьшается до 12.

Пределы прочности и текучести уменьшаются по мере удаления от поверхности ударно-волнового нагружения. Изменение механических свойств материала происходит в диапазоне 355 ÷ 850 МПа (для σ_T) и 950 ÷ 1 240 МПа (для $\sigma_{пр}$) в пределах упрочненного слоя толщиной ≈ 40 мм.

Основываясь на проведенных исследованиях физико-механических свойств в упрочненном слое материала, его можно условно разделить на несколько параллельных областей, каждая из которых характеризуется определенными свойствами. Такое разделение позволит более эффективно использовать градиент свойств, сформированный ударно-волновым нагружением.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жилкашинова А. М., Скаков М. К., Попова Н. А. Связь коэффициента деформационного упрочнения и пластической деформации аустенитной стали Гадфильда // Вестн. науки Сибири. — 2011. — № 1(1). — С. 686–690.
2. McLeod N. A. Method of hardening manganese steel: US Pat. 2.703.297. — March, 1955.
3. Champion A. R., Rohde R. W. Hugoniot equation of state and the effect of shock stress amplitude and duration on the hardness of Hadfield steel // J. Appl. Phys. — 1970. — V. 41, N 5. — P. 2213–2223.
4. Дерibas А. А. Физика упрочнения и сварки взрывом. — Новосибирск: Наука, 1972.
5. Application of explosive hardening on railway infrastructure parts: Электронный ресурс. — <https://www.researchgate.net/publication/260037432>.
6. Zhang F. C., Yang Z. N., Qian L. H., Liu F. C., Lv B., Zhang M. High speed pounding: A novel technique for the preparation of a thick surface layer with a hardness gradient distribution on Hadfield steel // Scripta Mater. — 2011. — V. 64, N 6. — P. 560–563.
7. Fatigue properties of austenitic Mn-steel in explosion depth hardened condition: Электронный ресурс. — <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/138643.pdf>.
8. Kovács T., Völgyi B., Sikari-Nágl I. Hadfield steel hardening by explosion // Mater. Sci. Forum. — 2014. — V. 792. — P. 93–97.
9. Liu F. C., Lv B., Zhang F. C., Yang S. Enhanced work hardening in Hadfield steel during explosive treatment // Mater. Lett. — 2011. — V. 65, N 15-16. — P. 2333–2336.
10. Zhang F. C., Lv B., Wang T. S., Zheng C. L., Zhang M., Luo H. H., Liu H., Xu A. Y. Explosion hardening of Hadfield steel crossing // Mater. Sci. Technol. — 2010. — V. 26, N 2. — P. 223–229.
11. Zhang F., Lv B., Wang T., Zheng C., Zhang M., Luo H., Liu H. Microstructure and properties of purity high Mn steel crossing explosion hardened // ISIJ Int. — 2008. — V. 48, N 12. — P. 1766–1770.
12. Гуськов А. В., Милевский К. Е., Эйсак М. Д. Сравнительный анализ упрочнения стали Гадфильда статической и высокоскоростной нагрузкой // Наука. Промышленность. Оборона: тр. XV Всерос. науч.-техн. конф. (г. Новосибирск, 23–25 апреля 2014 г.). — Новосибирск: НГТУ, 2014. — С. 207–210.
13. ГОСТ 7370-86 Крестовины железнодорожные типов Р75, Р65 и Р50. Технические условия. — М.: Изд-во стандартов, 1986.
14. Тушинский Л. И., Гуськов А. В., Милевский К. Е., Петров А. Ф. Влияние высокоскоростной ударной волны на микроструктуру и механические свойства стали Гадфильда 110Г13Л // Науч. вестн. НГТУ. — 2006. — № 4(25). — С. 186–194.
15. Guskov A. V., Milevsky K. E., Mihaylova N. Y. Research of Gadfield steel structure after dynamic loading // 7th World Conf. on Explosives and Blasting.: proc. — Moscow: EFEE, 2013. — Pt 2. — P. 143–146.
16. Гуськов А. В., Драньков Н. О., Милевский К. Е. Исследование механических свойств стали Гадфильда при высокоскоростном нагружении // Деформация и разрушение материалов. — 2011. — № 3. — С. 39–41.
17. Li M., Zhao S., Shi G. Explosive hardening of high Mn steel // Acta Metallurg. Sinica. — Ser. B. — 1991. — V. 4, N 3. — P. 164–167.
18. Zhang M., Lv B., Zhang F., Feng X. Explosion deformation and hardening behaviours of Hadfield steel crossing // ISIJ Int. — 2012. — V. 52, N 11. — P. 2093–2095.

19. **Influence** of explosive hardening on hardness and structure of Hadfield steel: Электронный ресурс. — <https://www.researchgate.net/publication/270283125>.
20. **Гуськов А. В., Милевский К. Е., Яковлев А. Г.** Физико-механические свойства стали Гадфильда после ударно-волнового воздействия // Наука. Промышленность. Оборона: тр. XV Всерос. науч.-техн. конф. (г. Новосибирск, 23–25 апреля 2014 г.). — Новосибирск: НГТУ, 2014. — С. 193–195.
21. **Hu X., Shen Z., Liu Y., Liu T., Wang F.** Influence of explosive density on mechanical properties of high manganese steel explosion hardened // J. Appl. Phys. — 2013. — V. 114, N 21. — Art. 213507.

Поступила в редакцию 25.07.2018.

После доработки 18.10.2018.

Принята к публикации 24.10.2018.
