



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-2-69-74>
УДК 534.2

Поступила 23.04.2020
Received 23.04.2020

ДИНАМИЧЕСКОЕ ЛЕГИРОВАНИЕ ВЫСОКОМАРГАНЦОВИСТОЙ СТАЛИ

Е. И. МАРУКОВИЧ, Институт технологии металлов НАН Беларуси, г. Могилев, Беларусь, ул. Бялыницкого-Бирули, 11. E-mail: info@itm.by,

С. М. УШЕРЕНКО, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: usherenko@gmail.com,

А. А. АНДРУШЕВИЧ, Белорусский государственный аграрный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 99/2. E-mail: andru49@mail.ru

О. П. РЕУТ, Филиал БНТУ «Институт повышения квалификации и переподготовки кадров по новым направлениям развития техники, технологии и экономики БНТУ», г. Минск, Беларусь, e-mail: rectorat@ipk.by

ДЖАВАД ЯЗДАНИ-ЧЕРАТИ, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65.

Рассмотрен один из вариантов создания композиционного материала на основе высокомарганцевистой стали 110Г13Л методом динамического легирования в режиме сверхглубокого проникновения сгустками порошковых частиц. Динамическое воздействие порошковых микрочастиц на матричную заготовку с последующей термической обработкой преобразует исходную литую сталь в композиционный материал и приводит к изменению механических свойств.

Ключевые слова. Динамическое легирование, сталь Гадфильда, композиционный материал, порошковые частицы, структура, прочность, твердость.

Для цитирования. Марукович, Е. И. Динамическое легирование высокомарганцевистой стали / Е. И. Марукович, С. М. Ушеренко, А. А. Андрушевич, О. П. Реут, Джавад Яздани-Черати // Литье и металлургия. 2020. № 2. С. 69–74. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-2-69-74>.

DYNAMIC ALLOYING OF HIGH MANGANESE STEEL

E. I. MARUKOVICH, Institute of Technology of Metals of National Academy of Sciences of Belarus, Mogilev, Belarus, 11, Bialynitskogo-Biruli str. E-mail: info@itm.by,

S. M. USHERENKO, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave. E-mail: usherenko@gmail.com

A. A. ANDRUSHEVICH, Belarusian State Agrarian Technical University, Minsk, Belarus, 99/2, Nezavisimosti ave. E-mail: andru49@mail.ru

O. P. REUT, Branch of the BNTU «Institute of Advanced Training and Retraining in new areas of technics, technology and economy of BNTU», Minsk, Belarus. E-mail: rectorat@ipk.by

JAVAD YAZDANI-CHERATI, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave.

The option of creating a composite material based on high manganese steel by the method of dynamic alloying in the super-deep penetration mode by flows of powder particles is considered. The dynamic effect of powdered microparticles on a matrix billet transforms the original cast steel into a composite material and leads to a change in mechanical properties.

Keywords. Dynamic alloying, Gadfield steel, composite material, powder particles, structure, strength, hardness.

For citation. Marukovich E. I., Usherenko S. M., Andrushevich A. A., Reut O. P., Yazdani-Cherati Javad. Dynamic alloying of high manganese steel. Foundry production and metallurgy, 2020, no. 2, pp. 69–74. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-2-69-74>.

Введение

Одним из самых интересных и полезных сплавов на основе железа и марганца является сталь Гадфильда (сталь 110Г13Л ГОСТ 977–88), содержащая 1,2% С и 13% Мн. Эта сталь характеризуется высокой степенью износостойкости и пластичности. Аустенит, образующийся в стали, обладает повышенной вязкостью, поэтому такую сталь трудно обрабатывать резанием. Поскольку применение режущих инструментов для обработки стали Гадфильда неэффективно, то для изготовления изделий из этого материала чаще всего применяют литье [1].

Сталь 110Г13Л обладает низкой твердостью, но в условиях высокого давления и ударных нагрузок показывает высокую износостойкость. Сталь Гадфильда обладает повышенной способностью к наклепу. Такая способность у этой стали значительно выше, чем у других сталей с подобной твердостью.

Ударная деформация или наклеп для данной марки стали приводит к такому повышению прочности, которое не удается получить закалкой. Такая технология обработки направлена на изменение формы изделия методом холодной ковки (пластической деформации), т. е. создания в материале структурных дефектов. При этом твердость стали повышается и увеличивается ее прочность, но уменьшается пластичность.

Невозможность закалки стали Гадфильда с получением привычного эффекта – упрочнения закаливаемой детали, заметил сам изобретатель этого стального сплава (английский металлург Р. Гадфильд, 1882 г.). При попытке закалить образец оказалось, что материал стал не тверже, а мягче [1].

Эффекты, которые реализуются в сталях при динамическом воздействии, позволяют создавать анизотропные композиционные материалы. Как правило, результатом действия высокого импульсного давления на сталь является сжатие вещества. Такой физический процесс приводит к кумуляции энергии взаимодействующих веществ [2,3]. Изменение плотности влияет на физические и химические свойства стали. При динамическом сжатии в пределах более чем 13 ГПа твердые материалы испытывают превращения с образованием новых кристаллических форм; наблюдаются переходы твердых диэлектриков и полупроводников в металлическое состояние и т. д. Полиморфные превращения в железных преградах характеризуются заметными изменениями объема. Например, изменение объема при α - ϵ -превращении в железе при нагружении волнами напряжений с амплитудой $\sigma_{\max} \geq 13$ ГПа [4] может достигать 6%. При давлении на уровне 40 ГПа удельный вес железа увеличивается на 39% [5].

Основные аномалии, обнаруженные за последние 45 лет при исследовании процессов обработки металлов и сплавов, относятся к особенностям динамического массопереноса. Желательно увеличение времени воздействия высокого давления. При этом энергетические затраты производственного процесса существенно возрастают.

Качественным доказательством существования эффекта сверхглубокого проникания (СГП) является появление новых структурных элементов в металлических преградах. Обычно в состав высокоскоростного сгустка микроударника вводили химические элементы, которые отсутствовали в исходном материале преграды [5]. В качестве примера можно рассмотреть взаимодействие железных преград со сгустками свинцовых микрочастиц. Также прошивка сгустками микрочастиц стальных заготовок позволяет увеличить интервал времени динамического воздействия. Использование таких частиц удобно с позиции контроля, которые, как правило, отсутствуют в исходной стали 110Г13Л.

Целью настоящей работы является изучение особенностей изменения структуры и твердости динамически легированной стали 110Г13Л в режиме СГП.

Изменения структуры и твердости стали 110Г13Л при динамическом легировании в режиме сверхглубокого проникания сгустками порошков карбида кремния и металла

Рассмотрим технологический вариант введения в режиме сверхглубокого проникания в образцы из стали 110Г13Л на глубину до 100 мм порошковых сгустков микрочастиц на основе карбида кремния. Использовали микроударники с размерами частиц менее 100 мкм. Карбид кремния SiC – твердый и легкий неметаллический материал. В качестве добавок в смеси на основе карбида кремния использовали металлические порошки никеля и олова.

Маркировка исследуемых образцов. Исходный образец № 1 – сталь 110Г13Л в литом виде. Образцы № 2 – сталь 110Г13Л с последующей динамической обработкой порошками SiC+Ni. Образец № 3 – сталь 110Г13Л с последующей динамической обработкой порошками SiC+Sn.

На рис. 1, а показана исходная литая сталь 110Г13Л, представляющая собой структуру аустенита с отдельными включениями карбидов. Структура стали 110Г13Л после литья и обработки смесью порошков SiC+Ni показана на рис. 1, б. На рисунке видно продольное сечение канала, сформированное

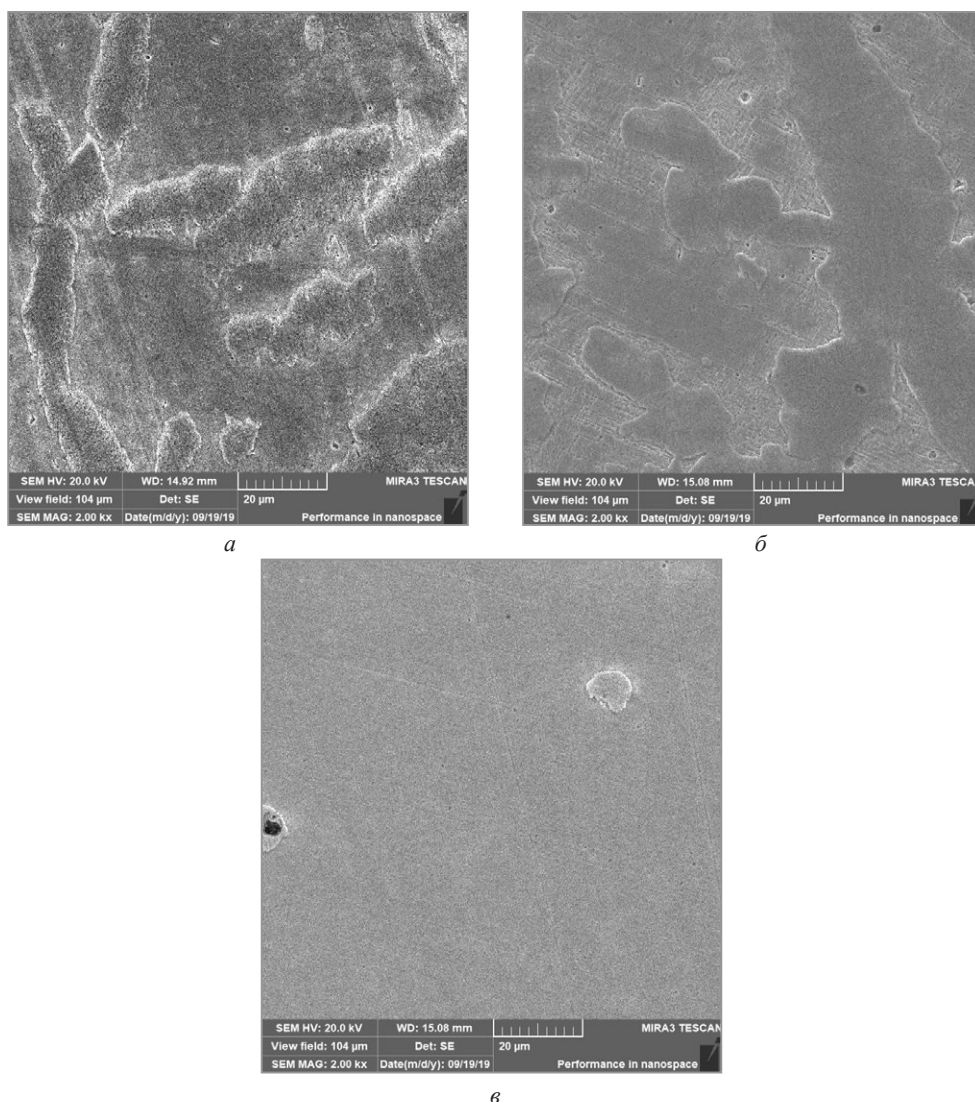


Рис. 1. Структура высокомарганцевистой литой стали 110Г13Л в исходном состоянии (*а*); после литья и прошивки смесью порошков SiC+Ni (*б*); после литья и прошивки смесью порошков SiC+Sn (*в*)

порошковым ударником. Структура сформировавшейся стали 110Г13Л после литья и обработки смесью порошков SiC+Sn показана на рис. 1, *в*, где видны поперечные сечения канальных элементов.

При элементном анализе структуры образца стали 110Г13Л после литья и прошивки смесью порошков SiC+Ni в структуре можно видеть остатки микроударников, например, микрочастицы карбида кремния (рис. 2).

На рис. 3, *а* показаны результаты качественного микроанализа химического состава образца исходной стали 110Г13Л (см. рис. 2, *а*), представленного на рис. 1, *а*, на рис. 3, *б* – образца стали, обработанного смесью порошков SiC+Ni (см. рис. 1, *б*), на рис. 3, *в* – образца стали, обработанного смесью порошков SiC+Sn (см. рис. 1, *в*). Микроанализ показал наличие маркерных легирующих элементов порошкового потока (Ni и Sn) в объеме обработанных в режиме СГП образцов стали.

Выполнена оценка изменения твердости образцов исследуемой стали после обработки сгустками порошковых микрочастиц в режиме сверхглубокого проникания. Измерение твердости проводили по методу Роквелла (ГОСТ 9013–59). В связи с этим использовали два варианта порошкового состава, которые отличались только тем, что никель (второй вариант) был заменен на олово (третий вариант). Было установлено, что твердость исходного материала (образец № 1) составляет по методу Роквелла 61–62 HRB или по методу Бринелля – 109–112 НВ. Для образца № 2 соответственно твердость – 78–80 HRB или 146–149 НВ, а для образца № 3 твердость – 76–77 HRB или 143–145 НВ. На основе сравнения изменений твердости 2-го и 1-го образцов установлено, что после динамической обработки достигнуто в среднем повышение HRB в 1,29 раза, а НВ – в среднем в 1,35 раза. При сравнении изменения параметров твердости по 3-му и 1-му варианту зафиксировано повышение HRB в 1,25 раз, а НВ – в 1,31 раза. Известно, что значение твердости по Бринеллю в первом приближении связано с прочностью

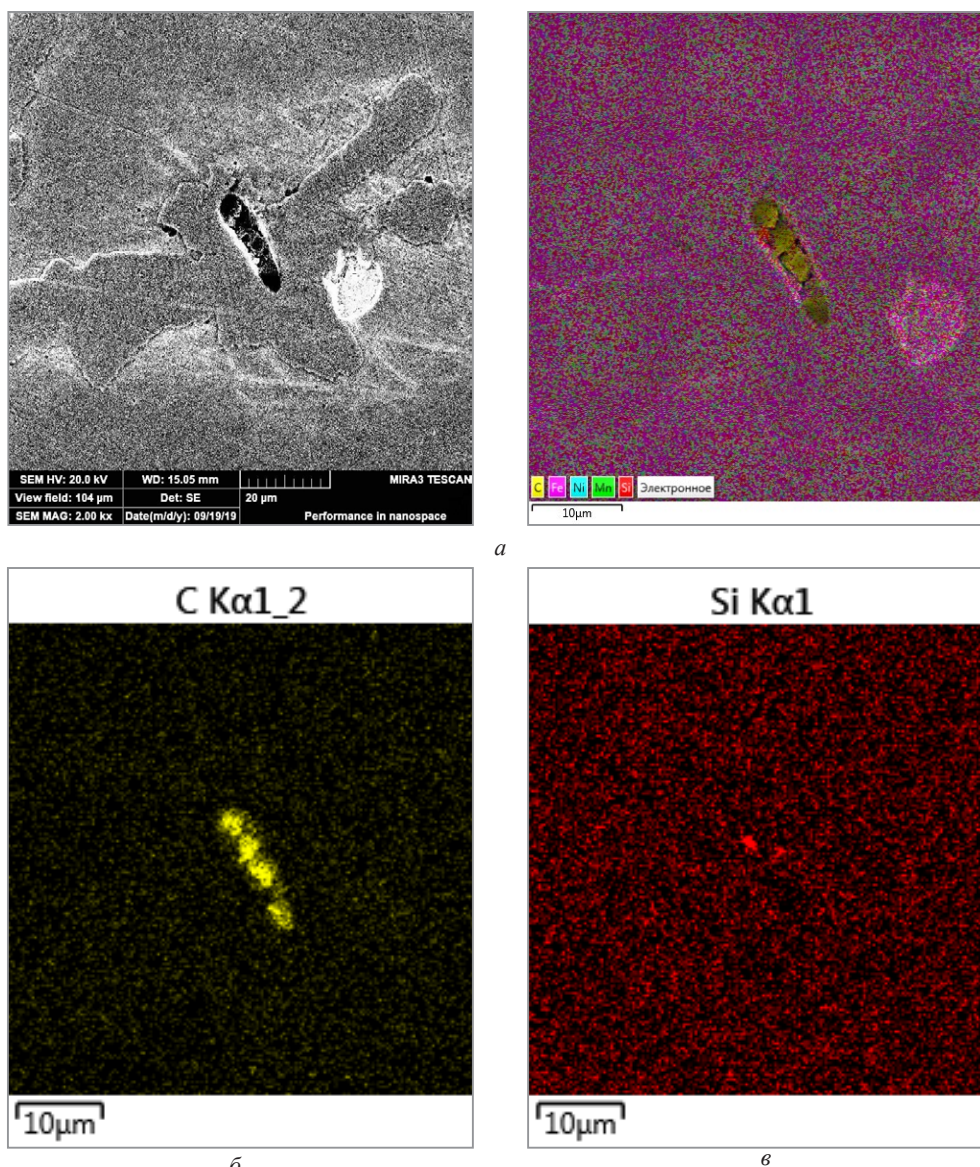


Рис. 2. Внедренная в сталь микрочастица карбида кремния (поэлементный анализ) (а); углерод (б); кремний (в)

зависимостью $HV/3$ ($\text{кгс}/\text{мм}^2$) [6]. Поэтому можно отметить определенный эффект упрочнения на обработанных образцах стали. В связи с этим использовали два варианта порошкового состава, которые отличались только тем, что никель (второй вариант) был заменен на олово (третий вариант). При прочих равных условиях наблюдалось уменьшение упрочнения стали 110Г13Л.

Оценим влияние термической обработки на изменение твердости динамически обрабатываемых образцов стали 110Г13Л. Режим термической обработки: нагрев – 650 °С, нагрев – 1100 °С, закалка – охлаждение в воде. Изменения твердости материалов в результате сверхглубокого проникания и термообработки незначительны и приведены в таблице. Из полученных экспериментальных результатов следует, что наиболее значимое изменение твердости образцов стали 110Г13Л достигается за счет их динамического легирования сгустками порошковых частиц, а не термической обработкой.

Объемное регулирование твердости динамически легированной стали 110Г13Л

Номер образца	Твердость образца № 1 после термообработки HRB	Твердость образца № 2 после термообработки HRB	Твердость образца № 3 после термообработки HRB
1	62,0	62,0	64,5
2	64,0	61,0	64,5
3	60,0	60,0	62,5
Среднее значение	62,0	61,0	63,8
Изменение твердости	Контрольная твердость	Разупрочнение 1,64%	Упрочнение 2,9%

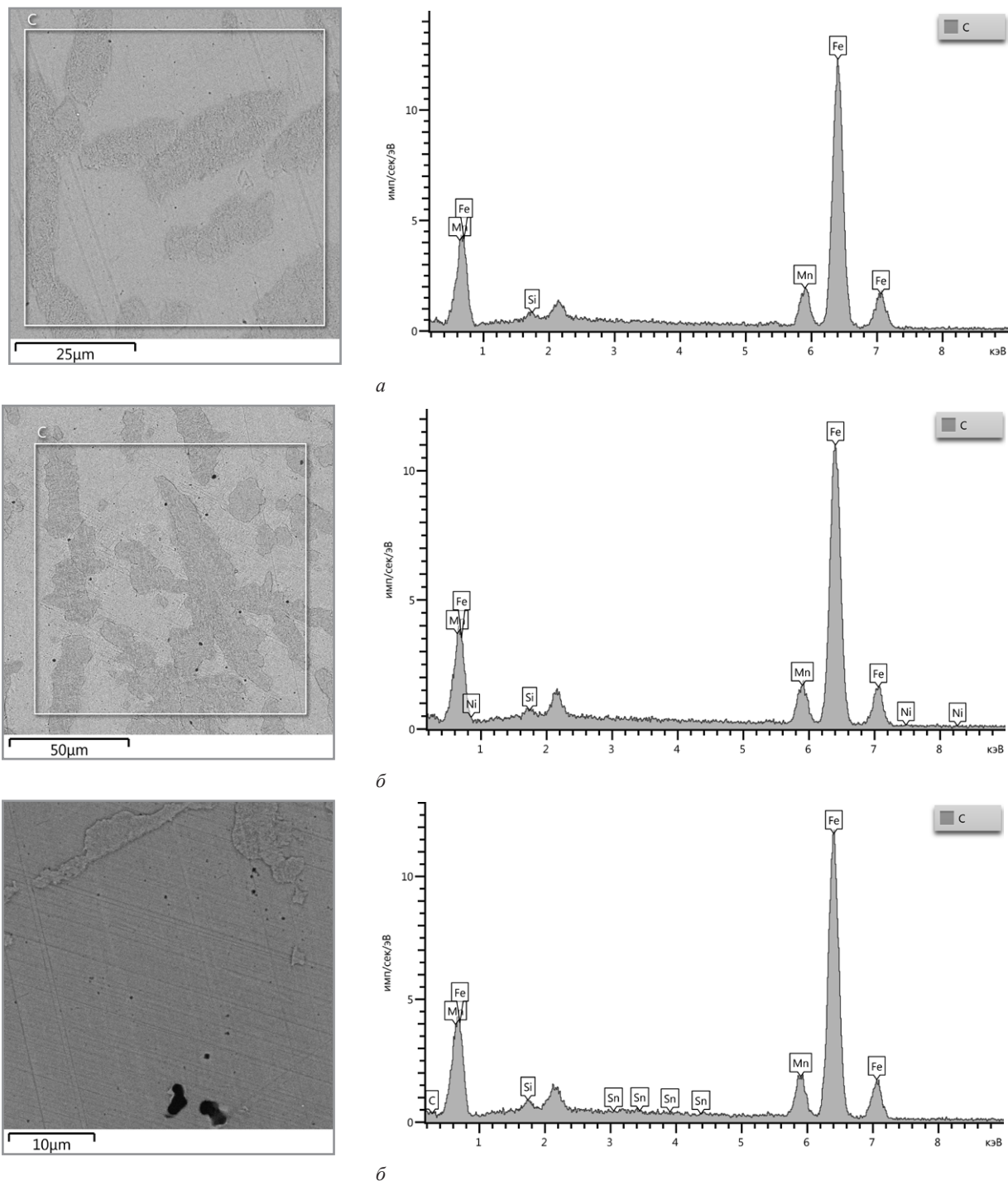


Рис. 3. Качественный микроанализ участков образцов стали 110Г13Л:
a – исходная сталь 110Г13Л; *б* – сталь 110Г13Л после обработки сгустками порошковой смеси SiC+Ni;
в – сталь 110Г13Л после обработки сгустками порошковой смеси SiC+Sn

Выводы

Установлено динамическое легирование высокомарганцевистой стали 110Г13Л материалом струи порошка при СГП.

Обработка литой марганцевистой стали 110Г13Л: исходная сталь – (образец № 1), в режиме сверхглубокого проникания сгустками микропорошков SiC+Ni (образец № 2) и SiC+Sn (образец № 3) и последующая термическая обработка позволяют изменять химический состав стали и механические свойства за счет ее преобразования в композиционный материал:

1) наиболее заметное изменение твердости образцов стали 110Г13Л достигается путем их прошивки сгустками порошковых частиц;

2) упрочнение (повышение твердости литой стали) отмечено после динамической обработки в режиме сверхглубокого проникания сгустками микропорошков SiC+Ni на 29%, сгустками микропорошков SiC+Sn – на 24,5%;

3) при одних и тех же условиях после термической обработки исходная литая сталь 110Г13Л упрочнение не получила; у динамически обработанных образцов сгустками микропорошков SiC+Ni (образец № 2) отмечено разупрочнение, SiC+Sn (образец № 3) – упрочнение.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Болобов В. И., Бошков В. С., Мишин В. И., Неструев А. А.** О влиянии режимов термомеханической обработки на износостойкость материалов быстроизнашиваемых элементов горно-обогатительного оборудования // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 1. С. 53–59.
2. **Kalinichenko A. S., Ovchinnikov V. I., Usherenko S. M., Yazdani-Cherati Javad F.** Improving properties of tool steels by method of dynamic alloying // Наука и техника. 2019. Т. 18. № 5. С. 369–379.
3. **Sobolev V. V., Baskevych O. S., Shyman L. M., Usherenko S. M.** Mechanism of thick metal walls penetration by high-speed microparticles // Науч. вест. нац. горного ун-та. 2016. № 6. С. 75–83.
4. **Owsik J., Jach K., Usherenko S. and other.** The physics of superdeep penetration phenomenon // Journal of Technical Physics, J. Tech. Phys. 2008. Т. 49. № 1. С. 25.
5. **Sobolev V. V., Usherenko S. M., Gubenko S. I.** Formation of chemical elements under combination of impact compression and bulk doping of microparticles // Material and exploitation problems in modern Materials Engineering. Czestochowa: Czestochowa university Technology, 2010. P. 135–147.
6. Термическая обработка в машиностроении: Справ. / Под ред. Ю. М. Лахтина, А. Г. Рахштадта. М.: Машиностроение, 1980. 783 с.

REFERENCES

1. **Bolobov V. I., Boshkov V. S., Mishin V. I., Nestruev A. A.** O vlijanii rezhimov termomechanicheskoy obrabotki na iznosostojkost' materialov bystroiznashivaemykh jelementov gorno-obogatitel'nogo oborudovanija [About the influence of thermomechanical processing modes on the wear resistance of materials of quickly wearing elements of mining and processing equipment]. *Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten'* = *Mountain News and Analysis Bulletin*, 2017, no. 1, pp. 53–59.
2. **Kalinichenko A. S., Ovchinnikov V. I., Usherenko S. M., Javad F. Yazdani-Cherati** [Improving properties of tool steels by method of dynamic alloying.. Science and Technique]. *Nauka i tehnika = Science and technology*, 2019, no.5, vol.18, pp. 369–379.
3. **Sobolev V. V., Baskevych O. S., Shyman L. M., Usherenko S. M.** Mechanism of thick metal walls penetration by high-speed microparticles. *Nauchnyj vestnik Nacional'nogo gornogo universiteta = Scientific Bulletin of the National Mining University*, 2016, no. 6, pp. 5–83.
4. **Owsik J., Jach K., Usherenko S.** The physics of superdeep penetration phenomenon. *Journal of Technical Physics, J. Tech. Phys.*, 49, 1, 3–25, 2008. Polish Academy of Sciences, Institute of Fundamental Technological Research, Warszawa. Military University of Technology, Warszawa.
5. **Sobolev V. V., Usherenko S. M., Gubenko S. I.** Formation of chemical elements under combination of impact compression and bulk doping of microparticles. Czestochowa, Czestochowa university Technology Publ., 2010, pp. 135–147.
6. *Termicheskaja obrabotka v mashinostroenii* [Heat treatment in mechanical engineering]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1980, 783 p.