



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2019-4-100-106>
УДК 534.2

Поступила 05.09.2019
Received 05.09.2019

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЛИТОЙ УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ В КОМПОЗИЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ

*Е. И. МАРУКОВИЧ, Институт технологии металлов НАН Беларуси, г. Могилев, Беларусь,
ул. Бялыницкого-Бирули 11. E-mail: Maruko@46mail.ru*

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

*Ю. С. УШЕРЕНКО, Филиал БНТУ «Институт повышения квалификации и переподготовки кадров
по новым направлениям развития техники, технологии и экономики БНТУ», г. Минск, Беларусь.*

E-mail: osher_yu@mail.ru

Выполнены экспериментальные оценки прочностных свойств композиционного материала на базе углеродистой стали 45, созданного прошивкой матричной стали в режиме сверхглубокого проникания сгустками порошковых частиц. Импульсное динамическое воздействие сгустков порошковых частиц и последующая термическая обработка преобразуют сталь в волоконный композиционный материал.

Ключевые слова. Сверхглубокое проникание, композиционные материалы, легирующие элементы, изменение физических и механических свойств.

Для цитирования. Марукович, Е. И. Преобразование литой углеродистой стали в композиционный материал / Е. И. Марукович, С. М. Ушеренко, Джавад Яздаани-Черати, Ю. С. Ушеренко // *Литье и металлургия*. 2019. № 4. С. 100–106. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2019-4-100-106>.

CONVERSION OF CAST CARBON STEEL INTO COMPOSITE MATERIAL

E. I. MARUKOVICH, Institute of Technology of Metals of National Academy of Sciences of Belarus, Mogilev, Belarus, 11, Bialynitskogo-Biruli Str. E-mail: Maruko@46mail.ru

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

Yu. USHERENKO, Branch of BNTU “Institute of Advanced Training and Retraining in new areas of technics, technology and economy of BNTU”, Minsk, Belarus. E-mail: osher_yu@mail.ru

Experimental estimates of the strength properties of a composite material based on carbon steel 45, created by piercing matrix steel in the mode of superdeep penetration by streams of powder particles, have been performed. Pulsed dynamic action by streams of powder particles and subsequent heat treatment converts steel into a fiber composite material.

Keywords. Super-deep penetration, composites, alloying materials, change in physical and mechanical properties.

For citation. Marukovich E. I., Usherenko S. M., Javad Yazdani-Cherati, Usherenko Yu.S. Conversion of cast carbon steel into composite material. *Foundry production and metallurgy*, 2019, no. 4, pp. 100–106. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2019-4-100-106>.

Введение. Интерес к физическим и химическим эффектам, которые проявляются в углеродистых сталях при динамическом воздействии, стимулируется потребностью современной техники в создании материалов со специальными свойствами. Непосредственным результатом действия высокого импульсного давления на стали является сжатие вещества. Полагают, что энергетически выгодно то направление физического процесса, которое ведет к сжатию взаимодействующих веществ [1]. В настоящее время известно, что повышение плотности фазы высокого давления не является общим правилом.

Изменение плотности влияет на физические и химические свойства стали. Например, 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 достаточно большими изменениями объема. В частности, скачок объема при α - ϵ -превращении, протекающем в железе при нагружении волнами напряжений с амплитудой $\sigma_{\max} \geq 13$ ГПа [2], достигает 6%. При давлениях на уровне 40 ГПа удельный вес железа увеличивается на 39% [3].

Для упрочнения по объему углеродистой стали требуется структурная перестройка, которая сопровождается повышением уровня механических свойств. Такой процесс потребует увеличения динамики нагружения, в том числе и времени воздействия. При этом энергетические затраты производственного процесса должны быть значительными. Основные аномалии, обнаруженные за последние 45 лет при исследовании процессов обработки металлов и сплавов, относятся к особенностям динамического взаимодействия.

Взаимодействие сгустков микроударников с металлическими преградами в природных условиях реализуется в условиях околоземного пространства. Такие условия длительное время рассматривали как неперспективную область исследований. В условиях открытого космоса резко усложняется и удорожается эксперимент, так как требуется статистический анализ результатов. Соударение с потоком микрочастиц [4, 5] десятки лет изучали как процесс износа поверхности.

Качественным доказательством существования эффекта сверхглубокого проникания (СГП) является появление новых структурных элементов в металлических преградах. Обычно в материал высокоскоростного сгустка вводят химические элементы, которые отсутствовали в исходном материале преграды [6]. Например, в качестве примера таких исследований можно рассмотреть взаимодействие железных преград со сгустками свинцовых микрочастиц. Также бомбардировка сгустками микрочастиц стальных заготовок позволяет увеличить интервал времени динамического воздействия. Использование таких частиц удобно с позиции контроля, так как свинец, как правило, отсутствует в исходной стали 45.

Целью настоящего исследования является изучение особенностей изменения удельного веса и механических свойств обработанной стали 45.

Легирование стали 45 в режиме сверхглубокого проникания сгустками порошков карбида кремния и металла

Рассмотрим в качестве наиболее простого технологического варианта введение в образцы из стали 45 на глубину до 100 мм порошковых сгустков на основе карбида кремния. Карбид кремния – высокотвердый и легкий неметаллический материал для ударника. В качестве добавки в смеси с карбидом кремния используются металлические порошки никеля и олова.

Маркировка исследуемых образцов. Сталь 45: исходный образец – № 1, сталь 45 ← SiC+Ni – № 2, сталь 45 ← SiC+Sn – № 3 (рис. 1).

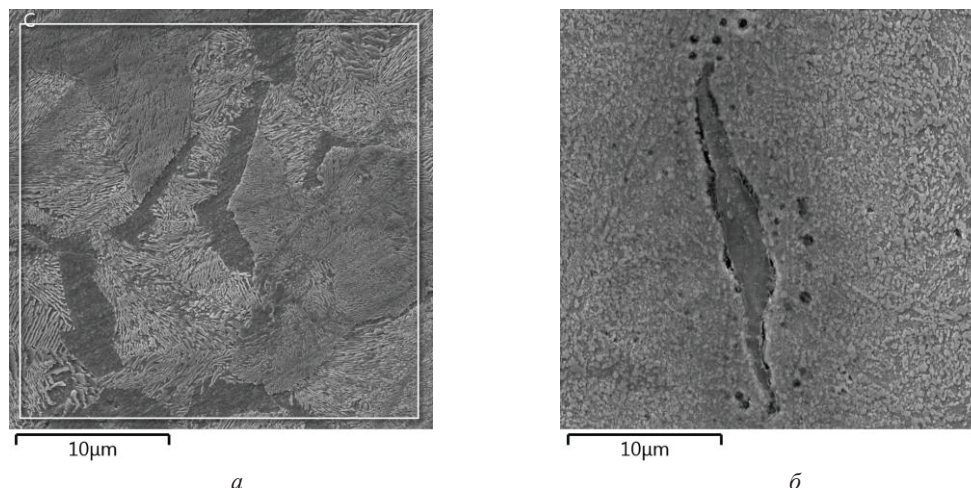


Рис. 1. Структура исходной стали 45 (образец № 1): *а* – зона исходной стали без включения; *б* – зона исходной стали с включением

На рис. 2 показан анализ исходной стали, а на рис. 3 – качественный анализ исходной стали 45 с включением марганца.

На рис. 4 показано включение кремния в обработанной стали 45.

На рис. 5, 6 показан анализ образца стали 45 после его прошивки в режиме СГП сгустком микрочастиц SiC+Ni. Концентрация никеля и кремния после такой обработки не превышает 0,3 мас. %.

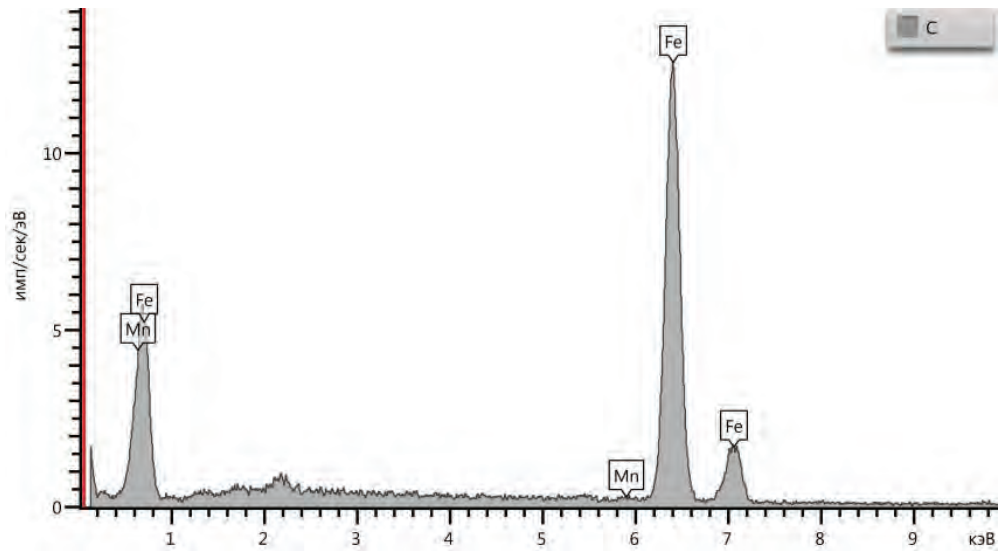


Рис. 2. Анализ химического состава исходной стали 45 (без динамической обработки)

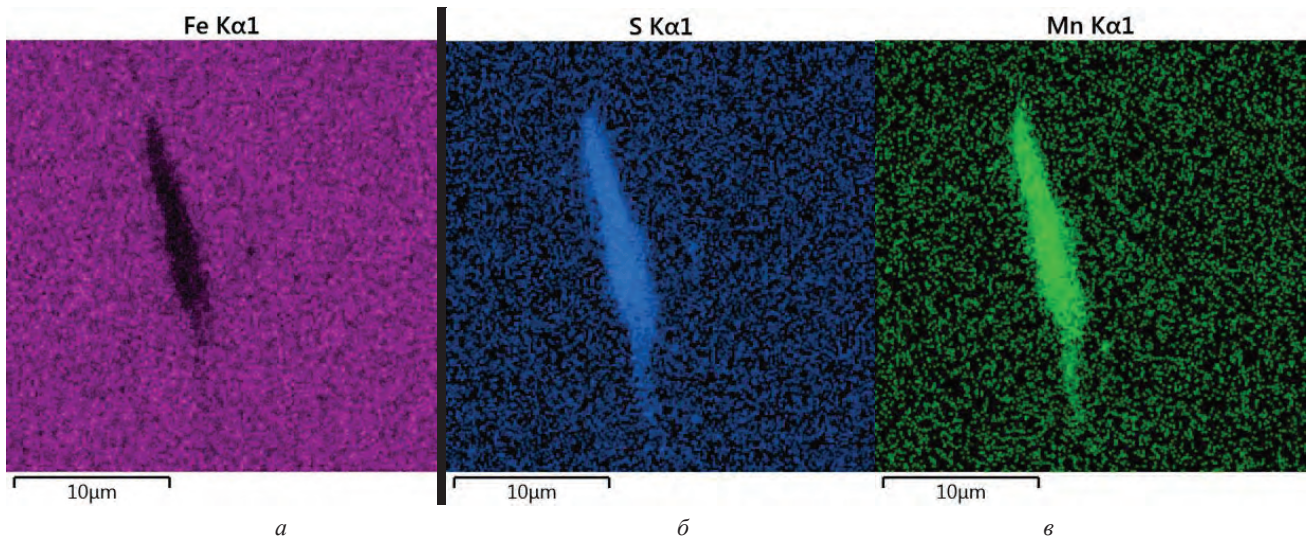


Рис. 3. Качественный анализ химического состава включения в исходной стали 45 (без динамической обработки):
а – анализ структуры на железо; б – анализ на серу; в – анализ на марганец

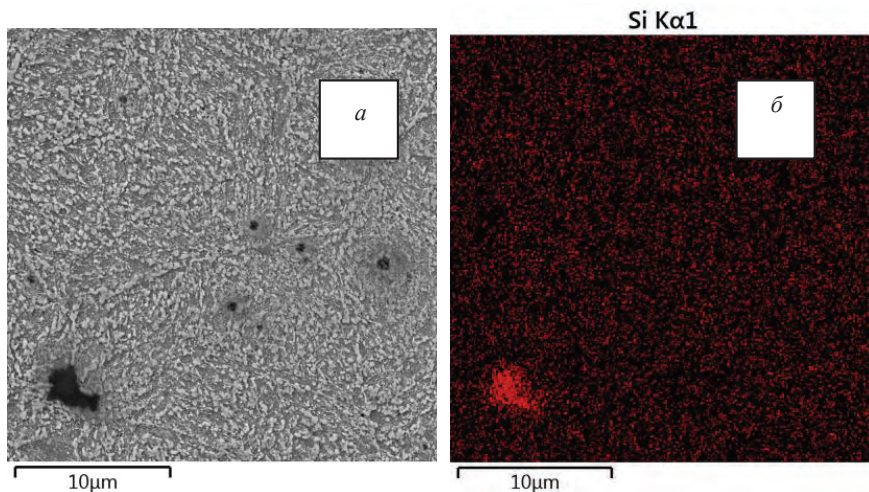


Рис. 4. Включение кремния в стали 45 после динамической обработки в режиме СГП:
а – структура стали 45 после обработки; б – анализ включения кремния

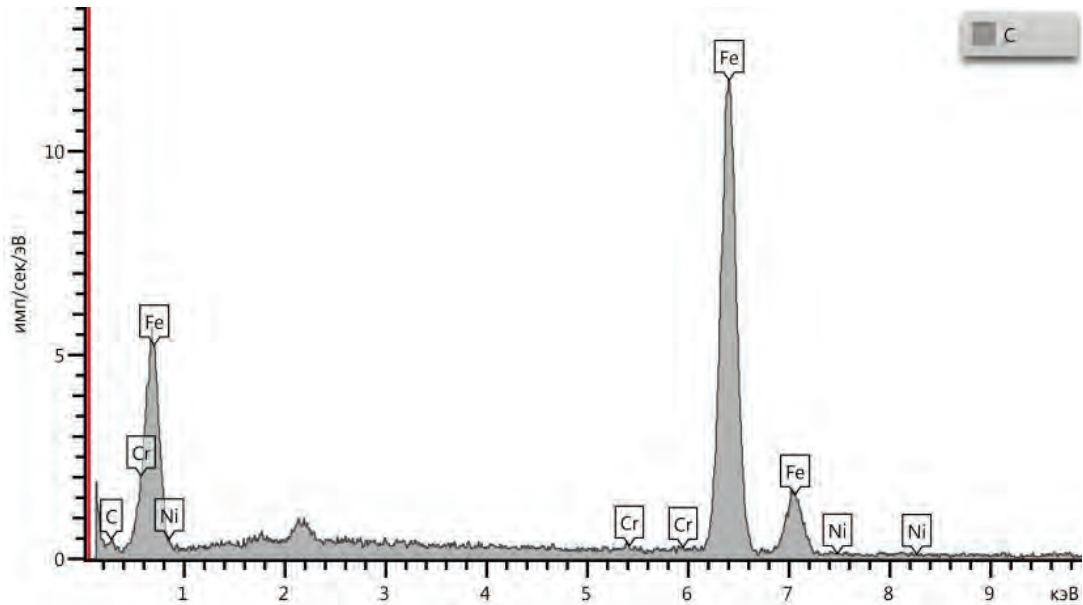


Рис. 5. Анализ структуры стали 45 после СГП сгустком микрочастиц SiC+Ni

Концентрация никеля и кремния после динамической обработки не превышала 0,3 мас. %.

Дополнительно был проведен анализ структуры стали 45 после ее прошивки сгустком микрочастиц SiC+Sn. На рис. 7 показан анализ зоны, легированной оловом. Концентрация олова и кремния после такой обработки не превышает 0,3 мас. %.

Изменение твердости и износостойкости модифицированной стали 45

Измерение исходной твердости стали 45: образцы № 1-1, № 1-2.

Замеры исходной твердости. Исходная сталь 45 не была подвергнута динамической обработке в режиме СГП, а также не было последующей термической обработки.

Образец № 1-1. Результаты измерения твердости на глубине 10 мм – $HB_{11} = 116$. Образец № 1-2. Результаты измерения твердости на глубине 40 мм – $HB_{12} = 110$.

Тогда усредненная твердость этих образцов исходной стали 45: образец № 1 $HB_1 = 113$.

Рассмотрим результаты изменения твердости после динамической прошивки стали 45 сгустком частиц SiC+Ni.

№ 2-1. Результаты измерения твердости на глубине 10 мм – $HB_{21} = 121$.

№ 2-2. Результаты измерения твердости на глубине 40 мм – $HB_{22} = 110$.

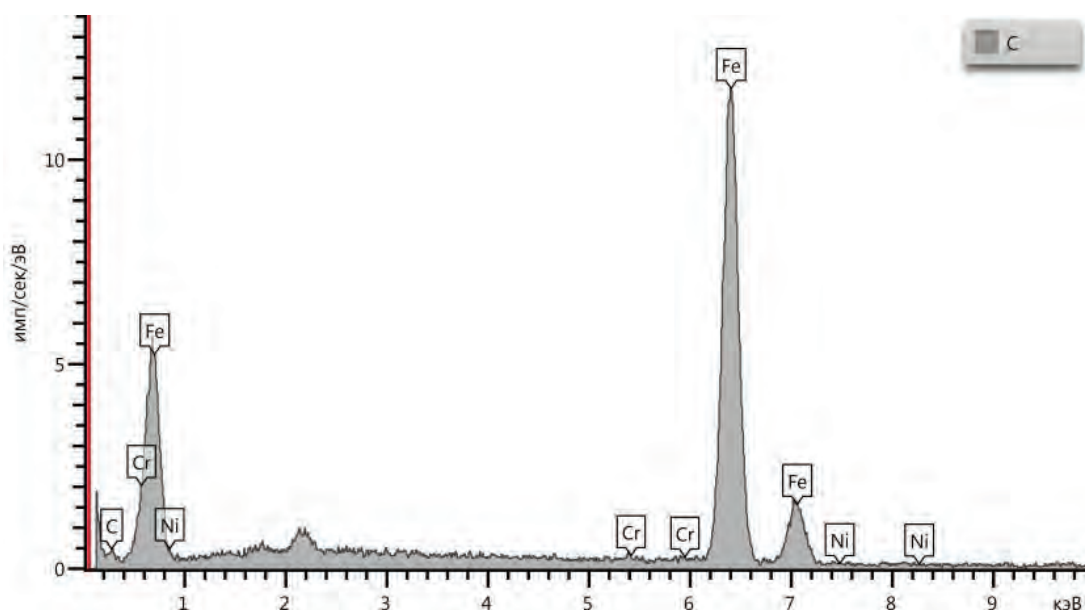


Рис. 6. Анализ структуры стали 45 после динамической обработки сгустком микрочастиц Ni

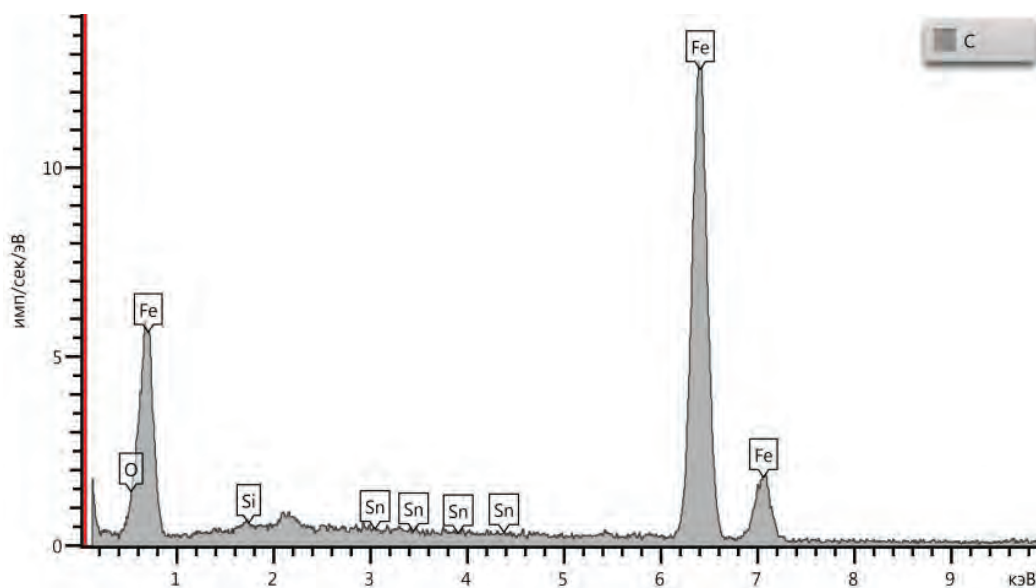


Рис. 7. Анализ структуры стали 45 после прошивки в режиме СП сгустками микрочастиц SiC+Sn

Итого усредненная твердость образца стали 45 для № 2 $HB_2 = 117,5$.

Тогда разница в твердости упрочненной стали по сравнению с исходной составляет 3,98%.

Рассмотрим результаты изменения твердости после прошивки стали 45 сгустком частиц SiC+Sn.

Образцы № 3-1, № 3-2.

3-1. Результаты измерения твердости на глубине 10 мм – $HB_{31} = 121$.

3-2. Результаты измерения твердости на глубине 40 мм – $HB_{32} = 129,5$.

Итого усредненная твердость образца стали 45 для образца № 3 $HB_2 = 125,5$.

Разница в твердости по сравнению с исходной сталью составляет 10,8%.

Рассмотрим изменения твердости в исходной стали 45 после термической обработки. Режим термической обработки постоянен. Закалка – 840 °С и охлаждение в воде. $HB_{1зак} = 640$.

№ 1-1. Результаты измерения твердости на глубине 10 мм – $HB_{11} = 640$.

№ 1-2. Результаты измерения твердости на глубине 40 мм – $HB_{12} = 640$.

Итого среднее значение твердости после термообработки исходной стали 45 для № 1 $HB_{1зак} = 640$.

Образец № 2 после термической обработки

№ 2-1. $HB_{2-1зак} = 667,5$; № 2-2. $HB_{2-2зак} = 640$.

Итого среднее значение твердости после термообработки исходной стали 45 для № 2 $HB_{2зак} = 653,7$.

Достигнуто повышение твердости упрочненной стали в зависимости от условий обработки – 2,14%.

Образец № 3 после закалки. № 3-1 $HB_{3-1зак} = 653$; № 3-2 $HB_{3-2зак} = 653$, т. е. в этом варианте обработки достигнуто повышение твердости от исходных условий обработки – 2,04%.

Итого средняя твердость образца стали 45 для № 3 $HB_{зак} = 653$ (табл. 1).

Таблица 1. Изменение твердости образцов на основе стали 45 после закалки

Номер образца	HRB среднее значение	HRC среднее значение	НВ до закалки	НВ после закалки	$K_{упр}$
1	65,0	63,0	113,0	640,0	1
2	67,0	62,0	117,5	653,7	1,02
3	72,5	63,5	125,3	653,0	1,02

Проведение дополнительного высокого отпуска 600 °С приводит к существенному снижению твердости (табл. 2).

Обычно изменение износа оценивается по потере массы во время испытания. Результаты такого вида испытаний приведены в табл. 3.

Образец № 1 = $(0,5655\% + 0,55\%)/2 = 0,5578\%$. Было: 31,8990 г, потеря массы за 2 ч – 0,1778 г.

Образец № 2 = $(0,5511\% + 0,4188\%)/2 = 0,4850\%$. Было: 31,8959 г, потеря массы за 2 ч – 0,1547 г.

Образец № 3 = $(0,29\% + 0,4490\%)/2 = 0,3695\%$. Было: 31,5235 г, потеря массы за 2 ч – 0,1166 г.

Потери при износе: № 1 – 100%; № 2 – 87%; № 3 – 66%.

Т а б л и ц а 2. Изменение твердости образцов стали 45 после высокого отпуска (600 °С)

Номер образца	Твердость HRC после отпуска – 600 °С			
	1	2	3	среднее значение
1.1	35,0	37,5	33,0	35,0
1.2	35,0	34,0	36,0	35,0
2.1	33,0	36,0	36,0	35,0
2.2	29,0	30,5	33,0	30,0
3.1	32,0	33,5	36,0	34,0
3.2	34,0	38,0	38,0	36,5

Т а б л и ц а 3. Потеря массы стальных образцов во время испытаний на износ

Номер образца	Исходная масса, г	30 мин, уменьшение массы, г	60 мин, уменьшение массы, г	90 мин, уменьшение массы, г	120 мин, уменьшение массы, г
1-1	32,0720	0,0611	0,0941	0,1336	0,1815
1-2	31,7259	0,0483	0,0820	0,1340	0,1741
2-1	31,9368	0,0562	0,0977	0,1379	0,1760
2-2	31,8550	0,0405	0,0848	0,1061	0,1334
3-1	31,5690	0,0352	0,0469	0,0694	0,0915
3-2	31,4780	0,0504	0,0905	0,1169	0,1416

Изменение удельного веса образцов из стали 45 как результат обработки в режиме СГП

Удельный вес стали 45 изменяется из-за дополнительной динамической обработки. Определение удельного веса стали проводится методом гидростатического взвешивания. Результаты определения удельного веса приведены в табл. 4.

Т а б л и ц а 4. Удельный вес стали 45 до и после обработки в режимах СГП

Номер образца	Исходная масса W_1 , г	Масса в воде с креплением $W_2 + W_1$, г	Масса в воде без крепления W_2 , г	Удельный вес, г/см ³
1-1	31,60330	27,81515	27,56145	7,8181
1-2	31,22110	27,52230	27,26860	7,8990
2-1	31,44265	27,68810	27,43440	7,8444
2-2	31,45440	27,68200	27,42830	7,8126
3-1	31,14310	27,40755	27,15385	7,8067
3-2	31,04410	27,34350	27,08980	7,8507

Масса скрепки – 0,2537 г. Удельный вес образцов: $\rho_1 = 7,8586$ г/см³; $\rho_2 = 7,8285$; $\rho_3 = 7,8287$ г/см³.

На основе полученных экспериментальных результатов установлено, что при использовании в качестве матрицы образцов углеродистой стали 45 (исходный состав – № 1) за счет прошивки смесью микропорошков SiC+Ni и термообработки был получен материал № 2. Если в качестве сгустка микроударников использовать SiC+Sn и термообработку, то получают композиционный материал № 3. Базовым отличием этих материалов между собой является изменение удельного веса. Если удельный вес исходного материала (№1) принимаем за 100%, то удельный вес образцов № 2 и 3 будет ниже на 0,6152%. Уменьшение удельного веса (плотности) достигается за счет увеличения дефектности (напряженного состояния).

При прочих равных условиях испытаний на износ это меняет потери массы композита на основе стали 45 для образца № 2 на 13%, а для образца № 3 – на 34%.

Выводы

Комплексная обработка углеродистой стали 45: исходной – (№ 1), в режиме прошивки сгустками микропорошков SiC+Ni – (№ 2) и SiC+Sn – (№ 3) и последующей термической обработки позволяет изменять состав, физические и механические свойства:

1) твердость стали после динамической обработки повышается для образца № 2 на 3,9%, а для образца № 3 – на 10,8%;

2) если удельный вес исходного материала (№1) принимаем за 100%, тогда удельный вес образцов № 2 и 3 снижается на 0,6152%;

3) в случае сочетания динамической и термической обработки повышение среднего значения твердости стали 45 для образца № 2 достигло 2,14%, а для образца № 3 – 2,04%;

4) при прочих равных условиях испытаний на износ потеря массы композита на основе стали 45 за счет материала микрочастиц, используемых для легирования в режиме сверхглубокого проникания, составляет для образца № 2 13%, а образца № 3 – 34% от массы износа образца № 1 – 100%.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Owsik J., Jach K., Usherenko S., Usherenko Y., Figovsky O., Sobolev V.** The Physics of Superdeep Penetration Phenomenon // Journal of Technical Physics. 2008. Vol. 49. № 1. P. 3–25.
2. **Marukovich E., Usherenko S., Usherenko Yu., Belous A., Petlisky A.** Formation of new materials based on cast aluminum alloy // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2011. № 5. P. 1183–1187.
3. **Попова С. В., Бражкин В. В., Дюжева Т. И.** Структурные фазовые переходы в сильно сжатом веществе и синтез фаз высокого давления // Успехи физических наук. Конференции и симпозиумы. 2008. № 178. С. 1104–1106.
4. **Belous A., Saladukha V., Shvedau S.** High Velocity Microparticles in Space: Influence Mechanisms and Mitigating Effects of Electromagnetic Irradiation. Springer.
5. **Bernhard, Ronald P., Eric L. Christiansen, James Hyde and Jeanne L. Crews.** Hypervelocity Impact Damage into Space Shuttle Surfaces // International Journal of Impact Engineering. 1995. № 17. P. 57–68.
6. **Sobolev V. V., Usherenko S. M.** Shock-wave initiation of nuclear transmutation of chemical elements // J. Phys, IY France. 2006. Vol. 134. P. 977–982.