

## Функциональные материалы и технологии с эффектом самоупрочнения при эксплуатации и их экономическая эффективность

*Обобщены функциональные материалы: износостойкие, коррозионно-жаростойкие, конструкционные, инструментальные, наплавочные и технологии их упрочнения, рекомендованные для быстроизнашивающихся деталей механического оборудования металлургических предприятий. Они основаны на принципе создания и использования метастабильных состояний, обеспечивающих реализацию деформационных фазовых превращений при испытаниях и эксплуатации, что обуславливает эффекты самоадаптации и самоупрочнения в процессе службы изделий. Показана высокая их экономическая эффективность для замены дорогостоящих аналогов.*

**Ключевые слова:** стали, чугуны, метастабильность, аустенит, мартенсит, самоупрочнение, износостойкость, экономическая эффективность.

**В**ведение. Быстроизнашивающиеся детали различного оборудования многих предприятий Украины изготавливают из дефицитных и дорогостоящих материалов, к тому же они требуют существенного повышения механических и эксплуатационных свойств. Задача создания новых экономнолегированных высокоэффективных материалов и способов повышения их характеристик, надежности и эксплуатационной долговечности деталей, а также их технико-экономическая оценка является весьма актуальной научной и прикладной задачей современного материаловедения.

Целью настоящей работы является обобщение исследований по разработке самоадаптирующихся экономнолегированных высокоэффективных материалов, способов и технологий упрочнения, основанных на использовании деформационных фазовых превращений при испытаниях и эксплуатации (ДФПИ), что обеспечивает эффект эксплуатационного самоупрочнения и обоснование их экономической эффективности.

В основу разработки новых самоупрочняющихся материалов разного функционального применения и упрочняющих технологий положен принцип создания метастабильности структуры – содержащей метастабильный аустенит, как это было предложено и использовано для сталей с метастабильным аустенитом [1]. Последний при нагружении способен претерпевать деформационные фазовые превращения (мартенситные, выделение карбидов и др.) [2, 3], что обеспечивает эффект деформационного самоупрочнения непосредственно в процессе испытаний механических свойств или эксплуатации. Это сопровождается повышением отдельных характеристик механических и эксплуатационных свойств, либо даже их комплекса. В работах [2, 3] предложено создавать и использовать метастабильность аустенита, наряду с другими структурными составляющими (мартенситом, бейнитом, карбидами и т. д.), во многих других

функциональных сплавах. Предложена классификация различных морфологических типов аустенита (основная фаза, остаточный, реверсированный или вторичный, сопутствующая или ведущая фаза в двухфазных ( $\gamma + \alpha$ ) сплавах, первичный, эвтектический (в белых чугунах), пересыщенный, азотистый) [2], который отличается химическим составом, морфологией и степенью метастабильности. Это позволило создавать новые метастабильные материалы с повышенными свойствами разного функционального назначения. Развитие деформационных мартенситных  $\gamma \rightarrow \alpha'$  или  $\gamma \rightarrow \varepsilon'$  превращений при испытаниях или эксплуатации (ДМППИ) сопровождается образованием мартенсита деформации, отличающегося от мартенсита закалки рядом особенностей и преимуществ. Одновременно это превращение характеризуется релаксацией микронапряжений, служит эффективным механизмом перераспределения и поглощения подводимой к материалу извне механической энергии [2, 3].

**Результаты и обсуждение.** Для изготовления ряда быстроизнашивающихся деталей механического оборудования обычно применяют износостойкие чугуны, многие из которых, например, «нихард» (ЧХ9Н5), ИЧХ12М, ЧХ16М2, ЧХ28Н2, «Клаймэкс эллой – 42», комплексно легированный износостойкий чугун (КЛИЧ) марки ЧХ15Г2НМФТ и др., содержат в составе дорогостоящие и остродефицитные компоненты (Ni, Mo, V, W, Nb и др.) [4], которые в Украине не производят и приобретают за валютные средства по импорту, что сдерживает их широкое использование.

Для замены этих материалов экономнолегированными, не содержащими этих элементов, учеными ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет» разработаны износостойкие чугуны на Fe-Cr-Mn и Fe-Mn основах, например, ЧХ(12-20)ГЗД, ЧХ15Г4Т, ЧГ(2-8)Ю, ЧГ6Ф и др. [5, 6].

Главной их особенностью и неоспоримым преимуществом является метастабильность аустенитной

составляющей структуры (первичного, эвтектического, остаточного), что обеспечивает эффект деформационного самоупрочнения в процессе эксплуатации благодаря развитию в рабочем поверхностном слое деталей наклепа, затем ДМПИ непосредственно под воздействием эксплуатационной абразивной среды (кокса, агломерата, известняка, дроби и пр.). Это превращение вызывает образование мартенсита деформации (аналогично тому, как образуется мартенсит при закалке), однако более дисперсного, твердого и износостойкого. Параллельно протекают процессы динамического деформационного старения мартенсита и аустенита (ДДС), обуславливающего дополнительное дисперсионное самоупрочнение выделяющимися высокодисперсными частицами карбидов и карбонитридов. Кроме того, эти ДФПИ сопровождаются перераспределением и поглощением энергии воздействующей эксплуатационной среды, в связи с чем, меньшая ее часть остается на разрушение поверхности деталей [2]. Все это в совокупности обеспечивает дополнительное и весьма существенное повышение износостойкости и долговечности деталей, изготовленных из этих чугунов.

Разработанные износостойкие экономнолегированные чугуны [6] получили промышленное использование:

- ЧХ15Г4Т внедрены для отливки и обработки защитных плит разгрузочной части агломашин аглофабрики (рис. 1), тракта шихтоподачи в доменных цехах (защитные плиты перекидного лотка, скипов и др.), взамен чугуна КЛИЧ (ЧХ15Г2НМФТ) и стали Гадфильда (110Г13Л);

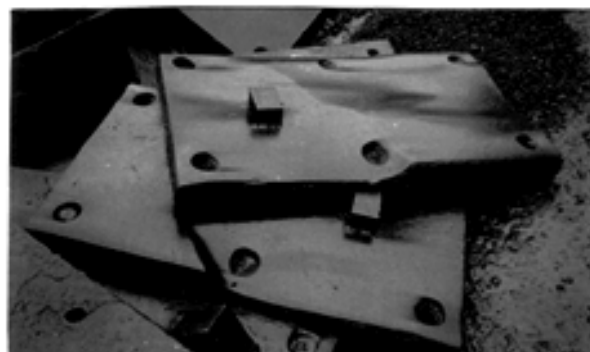
- ЧХ14Г6Т – для отливки и обработки плит защитного листа желоба агломашин с ребристой рабочей поверхностью (рис. 2): чередование выступов и впадин, расположенных перпендикулярно движению агломерата, обеспечивает эффект самофутеруемости воздействующим на плиты агломератом.

Анализ исходной микроструктуры и микроструктуры фрагментов футеровочных плит, отработавших в течение 1 года, показал следующее: преимущественно аустенитно-карбидная (литая) структура чугуна ЧХ15Г4Т (рис. 3, а) постепенно трансформировалась в процессе эксплуатации в смесь  $\alpha'$ -фазы и карбидов  $(Cr,Fe)_7C_3$  и  $(Cr,Fe)_{23}C_6$  (рис. 3, б) вследствие ДМПИ. При этом внутри бывших зерен

первичного аустенита наблюдаются дисперсные выделения вторичных карбидов  $(Cr,Fe)_{23}C_6$ , преимущественно сферической формы на фоне  $\alpha'$ -фазы, что свидетельствует о развитии процессов ДДС,



а



б



в

Рис. 1. Внешний вид футеровочных плит агломашин из разработанного чугуна ЧХ15Г4Т до эксплуатации – а, после эксплуатации – б и ножа скалывания после эксплуатации – в в течение 1 года (аглофабрика ЧАО «ММК им. Ильича»)

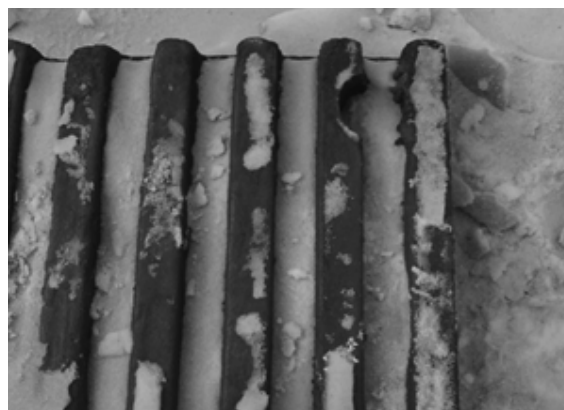
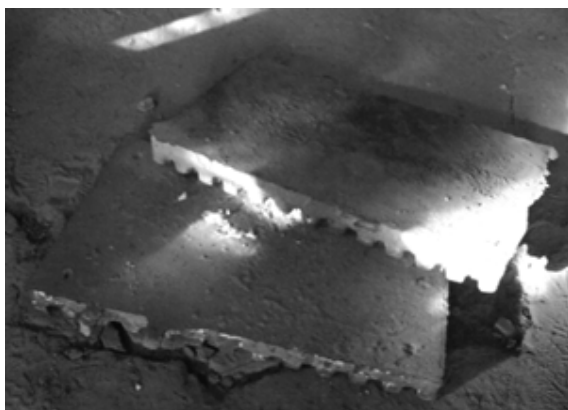


Рис. 2. Ребристые плиты защитного листа желоба агломашин аглофабрики ЧАО «ММК им. Ильича» из разработанного чугуна ЧХ14Г6ТЛ

дестабилизации аустенита вследствие обеднения его углеродом и хромом и термо-деформационном превращении в  $\alpha'$ -фазу.

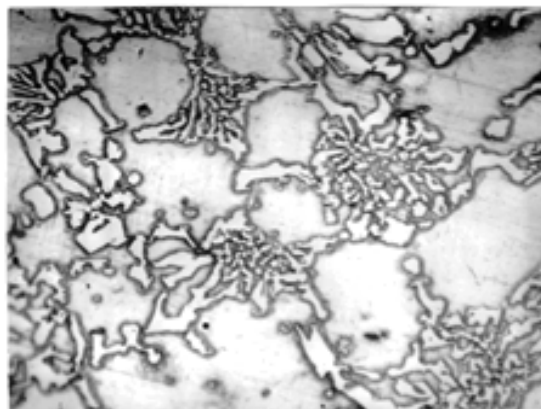
В результате этого микротвердость бывших аустенитных зерен возросла с  $H_{0,49} = 3900 \dots 4000$  МПа до  $H_{0,49} = 4500 \dots 4850$  МПа в  $(\alpha' + (Cr, Fe)_{23}C_6)$  смеси, а расположенные темные области около первичных карбидов (рис. 3, б) имели более высокую микротвердость 5300 МПа, что свидетельствует об образовании мартенсита вследствие ДМПИ. Этим объясняется повышенная износостойкость и долговечность плит.

Для замены дефицитных дорогостоящих чугунов ЧХ20НМФ (Германия), ЧХ14НМФ, ЧХ21НФ и ИЧХ28Н2МФТ, применявшихся для изготовления лопастей дробемеров, разработаны чугуны ЧХ12Г4Д2 и ЧХ20ГЗД [5] (табл. 1). Для бронефутеровочных плит дробемерных камер, испытывающих ударно-абразивное воздействие с большей величиной ударной составляющей, чем лопасти, разработан чугун ЧГ10Х4Ю с повышенным содержанием марганца и преимущественно аустенитной структурой металлической основы несколько большей степени стабильности. Сравнение свойств известных износостойких чугунов, с разработанными экономнолегированными сплавами показывает (табл. 1), что по ударно-абразивной износостойкости и ударной вязкости новые чугуны не уступают своим аналогам. При этом они значительно дешевле и доступнее, поскольку не содержат остродефицитных элементов.

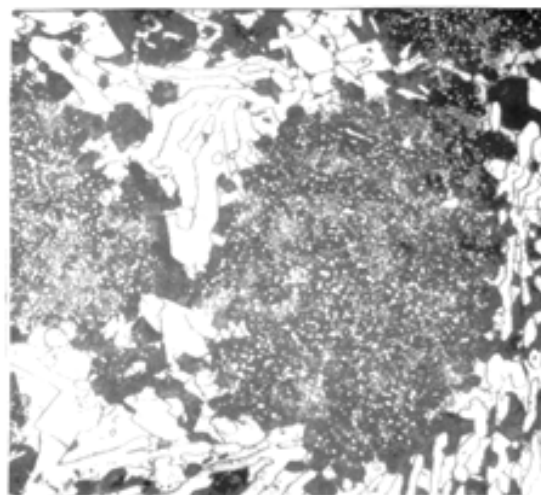
При замене применявшихся чугунов на разработанные ЧХ12Г4Д2 и ЧХ21Г7Д2 в условиях объединения «Красный котельщик» долговечность лопастей дробемеров возросла более чем в 30 раз по сравнению со стойкостью деталей из чугуна СЧ15 и в 1,5...2 раза – никельсодержащего чугуна ИЧХ28Н2МФТ и соответствовала долговечности покупных деталей импортного производства.

Применение новых чугунов с метастабильной структурой, самоупрочняющихся при эксплуатации, позволяет экономить остродефицитные легирующие компоненты (никель, молибден, ванадий), снизить их стоимость в пределах 420...470 долл./т при одновременном повышении долговечности деталей в 1,5...2,5 раза, сократить ремонтно-эксплуатационные затраты, повысить производительность оборудования.

В целях экономии никеля и замены дорогих жаростойких сталей типа 35Х23Н7СЛ, 40Х24Н12СЛ (содержат 7...13% Ni), применяющихся для деталей печной арматуры (рис. 4), в ГВУЗ «ПГТУ» разработаны безникелевые жаростойкие стали на Fe-Cr-Mn основе [7]. Стали содержат 21...23,5% хрома, марганца, кремния при небольшом содержании ванадия 0,1...0,25%, никель исключен из состава. Для



а ×450



б ×850

Рис. 3. Микроструктура чугуна ЧХ15Г4Т в литом состоянии – а и фрагмента футеровочной плиты из него – б после 1 года эксплуатации

Таблица 1.

**Сравнительные показатели свойств известных и разработанных экономнолегированных чугунов**

Марка чугуна, изготовитель	Металлическая основа	Твердость HRC	Относит. износостойкость, $\epsilon$	Ударная вязкость КС, Дж/см <sup>2</sup>
<b>известные чугуны</b>				
ИЧХ28Н2МФ ОАО «Красный котельщик»	М-А	52	96	15
ЧХ16МНФТ (ОАО «Амурлитмаш»)	М	68,3	270	4,2
ЧХ21НФ (Камышинский кузнечно-литейный завод)	М	58	183	4,0
<b>разработанные экономнолегированные чугуны</b>				
ЧХ20ГЗД	А-М	47	288	9,0
ЧГ10Х4Ю	А	49,5	185	13,0



а



б

**Рис. 4.** Детали печной арматуры из безникелевых жаростойких сталей: а – подвеска; б – скоба

изготовления колосников спекательных тележек агломерационных машин металлургическими предприятиями широко используют износостойкие и жаростойкие чугуны типа ЧХ28Н2 и стали 75Х28Н2СЛ, содержащие ~ 2% никеля и большое количество хрома 27...30%. С целью экономии никеля и хрома, при сохранении на высоком уровне эксплуатационной долговечности таких материалов, ГВУЗ «ПГТУ» совместно с ЧАО «ММК им. Ильича» разработал состав нового экономнолегированного жаростойкого сплава, который содержит меньше на ~8% количество хрома, исключено содержание никеля, при дополнительном легировании кремнием и титаном [8]. В условиях циклирования температуры (~700↔20 °С), что имеет место при эксплуатации колосников, твердость известных применявшихся ма-

териалов (ЧХ28Н2, ЧХ24Т, 75Х28Н2СЛ) постепенно снижается на 6...8 HRC, в то время как в разработанном сплаве она повышается на 5...7 HRC. Последнее объясняется эффектом дестабилизации аустенита, постепенным образованием мартенсита закалки (на стадии охлаждения) и дисперсионным упрочнением. В результате износостойкость известных никельсодержащих материалов в процессе работы постепенно снижается, а разработанного сплава – напротив, повышается. По жаростойкости новый безникелевый сплав соответствует стали 75Х28Н2СЛ, поэтому является серьезной альтернативой дорогостоящим чугунам, сталям и эффективным их заменителем. Разработанные экономнолегированные сплавы внедрены в ПАО «Азовмаш» и ЧАО «ММК им. Ильича».

Для ряда деталей насосного оборудования (рабочие колеса, аппараты направляющие, отводы) используют коррозионно-стойкие стали аустенитного класса 12Х18Н9Л, 12Х18Н10ТЛ, аустенитно-ферритного и феррито-аустенитного классов марок 08Х22Н6Т, 08Х18Г8Н2Т, которые содержат от 2 до 11% остродефицитного никеля, что сдерживает их порой необоснованное использование. В целях экономии никеля и эффективной замены указанных сталей на экономнолегированные при сохранении достаточной коррозионной стойкости, повышения механических и эксплуатационных свойств в ГВУЗ «ПГТУ» разработаны безникелевые коррозионно-стойкие стали аустенитно-ферритного и феррито-аустенитного классов (08Х18Г6СФ, 08Х22Г6СФ, 12Х16Г(7...9)СТЛ и др.) с метастабильной аустенитной фазой [9]. Метастабильность структуры обуславливает протекание  $\gamma \rightarrow \alpha'$  ДМПИ, что значительно повышает комплекс механических свойств (табл. 2), который значительно превышает свойства известных дорогих Fe-Cr-Ni сталей.

Новые стали рекомендуются для изготовления деталей насосов погружных и центробежных, которые применяются для перекачки воды (речной, водопроводной, технической, морской), средней и слабой агрессивности (раствор технического аммиака, моноэтаноламина и др.). Сталь оптимального состава 10Х17Г10НДСЛ, с повышенным комплексом физико-механических свойств и коррозионной стойкости, внедрена в ОАО «Южгидромаш» (г. Бердянск, Украина) для изготовления деталей насосов, которые успешно эксплуатировались при нефтедобыче в условиях морской воды Южно-Китайского моря.

Для восстановления электродуговой наплавкой изношенных цапф сталеразливочных ковшей, ходовых

Таблица 2

**Механические свойства разработанных безникелевых и хромоникелевых коррозионно-стойких сталей**

Марка стали	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_T$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	КСУ, МДж/м <sup>2</sup>	КСУ, МДж/м <sup>2</sup>
08Х18Г6СФ	990...1240	475...490	30...39	20...38	> 3,75	–
08Х22Г6СФ	700...990	485...510	40...46	50...67	2,5...3,5	–
20Х18Г9С2ДЛ	760...810	520...600	28...33	27...35	–	3,7
08Х22Н6Т [9]	680	410	40	45	–	2,5
10Х18Н9Л (ГОСТ 977-88)	441	177	25	35	–	0,98

колес мостовых кранов в ГВУЗ «ПГТУ» разработаны порошковые наплавочные ленты ПЛ-Нп-20Г14АФ-А-Ф (ПЛН-6) и ПЛН-7 [3, 10], не содержащие дефицитных компонентов. Относительная износостойкость аустенитного метастабильного металла, наплавленного лентой ПЛН-7 (ПЛ-Нп-25Х14Г12Ф-АФ) оптимального состава в 1,5 раза выше, чем лентой ПЛН-6 и в 3,9 раза выше, чем более дорогой, ранее применявшейся лентой ПЛН-4 (содержит Mo, V, Nb), что объясняется оптимальным и более эффективным развитием  $\gamma \rightarrow \alpha'$  ДМПИ. Долговечность ходовых колес тяжело нагруженных мостовых кранов мартеновского цеха, наплавленных лентой ПЛН-7, в 1,5...1,6 раза выше, чем лентой ПЛН-6.

Многие наплавочные материалы, применяющиеся для восстановления наплавкой металлургического оборудования, содержат остродефицитные легирующие элементы (никель, молибден, ванадий, ниобий), что увеличивает ремонтно-эксплуатационные затраты и не всегда экономически оправдано. Для восстановления электродуговой наплавкой валков пилигримовых прокатных станов, роликов рольгангов и других деталей металлургического оборудования широко применяют дорогую и дефицитную проволоку Св-08Х21Н10Г7СТ, содержащую 9,5...10,5% никеля, ~ 20% хрома. С целью экономии остродефицитных компонентов и замены дефицитных материалов, была разработана наплавочная порошковая проволока, обеспечивающая наплавку метастабильного Fe-Cr-Mn наплавленного металла (НМ) [11, 12], способного к самоупрочнению при трении-изнашивании непосредственно в процессе эксплуатации. Как показали сравнительные испытания, относительная износостойкость Fe-Cr-Mn НМ марок 20Х(10...12)Г(6-9)СТАФ в условиях сухого трения ( $\epsilon$ ) в 1,6...2 раза выше, а в условиях абразивного ( $\epsilon_a$ ) и ударно-абразивного изнашивания ( $\epsilon_{у.а.}$ ) в 1,5...1,7 раза выше, чем стали 08Х20Н10Г7СТ. При наплавке разработанной порошковой проволокой в 3-м...4-м слоях формируется аустенитно-мартенситная структура с деформационно-метастабильным аустенитом, а при наплавке проволокой Св-08Х20Н10Г7СТ – аустенитная достаточно деформационно-стабильная структура, не претерпевающая деформационных фазовых превращений.

Учитывая термоциклические условия эксплуатации валков пилигримовых станов (чередование циклов разогрева поверхности до температур ~450...550 °С и охлаждения до температур выше комнатной), исследовано влияние низкотемпературной термоциклической обработки (НТЦО) [13] в температурном интервале 600↔20 °С на изменение структуры и свойства НМ. После оптимальных режимов НТЦО относительная износостойкость разработанного Fe-Cr-Mn НМ более чем в 2 раза выше износостойкости

применяющегося металла 08Х20Н10Г7СТ (рис. 5). Экономическая эффективность замены дорогостоящей проволоки Св-08Х20Н10Г7СТ на разработанную ПП-Нп-20Х12Г9СТ составляет ~800...850 долл. на 1 т НМ за счет меньшей стоимости и не дефицитности, благодаря исключению из состава 100...110 кг/т никеля, меньшем – на 8...9% содержанием хрома и значительно большей – в 1,6...2 раза износостойкости.

Проведены также производственные испытания проводок шаропркатного стана СПШ-80 (ЧАО «МК «Азовсталь»), наплавленных в 3 слоя (12-14 мм на сталь 45 под флюсом АН-349) разработанной порошковой проволокой ПП-Нп-12Х12Г9СТАФ, обеспечившей НМ с метастабильной аустенитно-мартенситной структурой, которые показали повышение долговечности деталей в 1,5...2,0 раза в сравнении с применяющейся сталью 60С2. Новая технология восстановления проводок может быть рекомендована для восстановления наплавкой проводок и других быстроизнашивающихся деталей металлургического оборудования, работающих в похожих условиях изнашивания, что даст экономию и повышение производительности оборудования.

Для ряда деталей оборудования, работающих в условиях ударных нагрузок в сочетании с ударно-абразивным износом, которые изготавливаются из стандартных сталей марок 55С2, 60С2, 6ХС, разработаны режимы изотермической закалки [14]. Они обеспечивают формирование структуры нижнего бейнита с повышенным количеством 27-35% метастабильного остаточного аустенита ( $A_{ост}$ ), способного к развитию  $\gamma_{ост} \rightarrow \alpha'$  ДМПИ и реализации эффекта самоупрочнения в процессе работы деталей или инструмента. В результате значительно повышается комплекс механических свойств сталей 55С2 и 60С2 ( $\sigma_B=1500-1950$  МПа,  $\sigma_{0,2}=1290-1500$  МПа,  $\delta=13...14\%$ ,  $\psi=20...56\%$ ,  $KCU=0,42-0,7$  МДж/м<sup>2</sup>) и износостойкость, долговечность пневмозубил, термически обработанных по новой технологии, увеличилась в 2 раза.

Для впускных и сливных клапанов и седел распределительных корпусов гидросистемы прессов, которые изготавливают из нержавеющей сталей 20Х13,

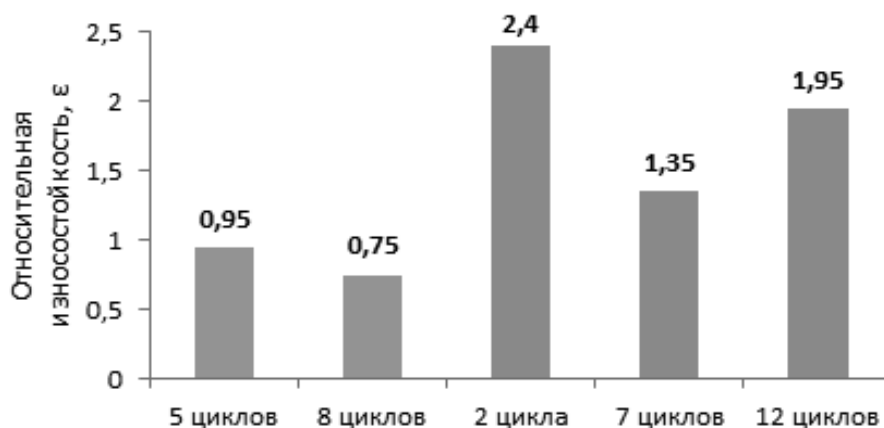


Рис. 5. Сравнительные показатели относительной износостойкости применяющегося наплавленного металла 08Х20Н10Г7СТ и разработанного 12Х13Г12СТАФ после НТЦО 600↔20 °С

30X13, разработаны новые режимы закалки ТВЧ (для некоторых седел клапанов – закалки с печным нагревом) при повышенных температурах 1300...1350 °С, обеспечивающих сохранение, наряду с высокодисперсным мартенситом закалки, повышенного количества метастабильного  $A_{\text{ост}}$  (25...35%) [15]. В результате, в процессе эксплуатации клапанных пар, реализуется эффект деформационного самоупрочнения (самозакалки), благодаря постепенному развитию  $\gamma_{\text{ост}} \rightarrow \alpha'$  ДМПИ в рабочем слое контактирующих поверхностей. Эта технология позволила повысить долговечность клапанов в 11 раз и внедрена в ПАО «Азовмаш».

Инструментальные стали X9Ф, X10Ф, 9X4ВФ, с пониженным содержанием хрома, разработаны для изготовления биметаллических шорошечных дисков горнопроходческих комплексов, которые после разработанных режимов закалки содержали 10...16% метастабильного  $A_{\text{ост}}$  наряду с мартенситом закалки. Оработана технология термической обработки, обеспечивающая повышение комплекса механических свойств и износостойкости, благодаря оптимальной структуре и кинетике  $\gamma_{\text{ост}} \rightarrow \alpha'$  ДМПИ. Промышленные испытания шорошечных дисков горнопроходческих комплексов после обработки по разработанной технологии при проходке Северомуйского тоннеля показали стойкость сталей X9Ф и X10Ф на 35...40% выше, чем стали X12МФ. Это соответствует долговечности более дорогих дисков производства фирмы «Вирт» (Германия) и других зарубежных аналогов, а диски из стали 9X4ВФ имеют на 10% большую стойкость [16].

Стали типа X12Ф1 и X12М после разработанных режимов закалки с повышенных температур 1100-1150 °С содержат повышенное количество метастабильного  $A_{\text{ост}}$  (40- 70%), наряду с мартенситом закалки и карбидами  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ ,  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ . Производственные испытания опытно-промышленной партии молотков из стали X12М, термообработанных по оптимальному режиму, проведенные на Большевском комбикоромовом заводе, показали повышение их стойкости в 2...2,5 раза в сравнении с серийно выпускавшимися закаленными молотками из стали 30ХГСА. Это объясняется развитием  $\gamma_{\text{ост}} \rightarrow \alpha'$  ДМПИ в поверхностном рабочем слое, что обеспечивает эффект самоупрочнения при эксплуатации.

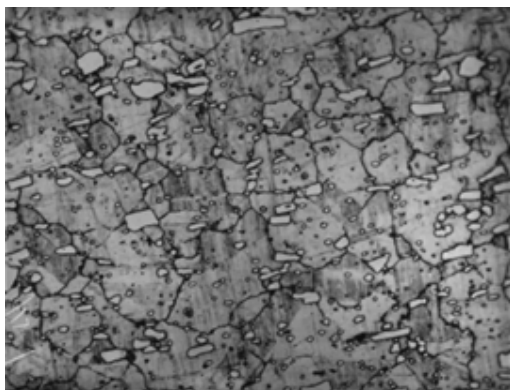
Предложена замена материала фильер из быстрорежущих сталей типа P18, P6M5 правильно-

резного автомата И6122А, используемого для рихтовки и выравнивания из бунтов стальной арматуры, на менее дорогие стали типа X12Ф1 и X12М. Для этих сталей отработаны рациональные режимы закалки с повышенных температур 1150...1200 °С и среднетемпературного отпуска, обеспечивающие сохранение в структуре 60...65% метастабильного  $A_{\text{ост}}$ . В процессе эксплуатации фильер под деформирующим и истирающим воздействием арматуры в поверхностных слоях в зоне контакта протекает  $\gamma_{\text{ост}} \rightarrow \alpha'$  ДМПИ и как результат, достигаются эффекты самоадаптации и самоупрочнения, что увеличивает эксплуатационный ресурс. Анализ микроструктуры изношенных фильер показал, что преимущественно аустенитная исходная структура с небольшим количеством карбидов  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  закаленного (с 1200 °С) состояния в зоне интенсивного изнашивания, разогрева и выработки претерпевала существенные изменения (рис. 6).

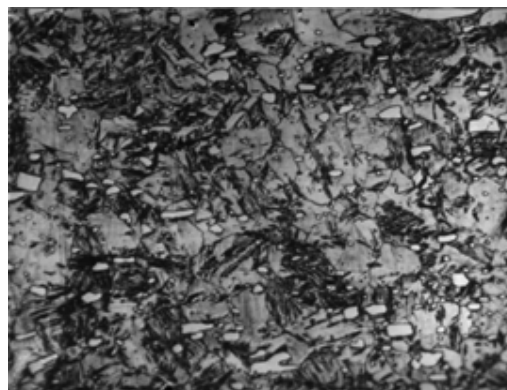
В ней наблюдается выделение значительного количества карбидов  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  и  $\text{Mo}_2\text{C}$  как по границам зерен, так и внутри них, и образование мартенсита деформации (рис. 6, б). Это свидетельствует о развитии процессов динамического деформационного старения и ДМПИ в процессе эксплуатации под воздействием обрабатываемой арматуры, что сопровождается повышением твердости в этой зоне. Твердость в местах контакта фильеры с арматурой в процессе эксплуатации повышалась на 3...5 HRC. При этом выработка фильер по диаметру была равномерной и значительно меньшей. В результате долговечность фильер возросла в 1,5 раза в сравнении со сталью P18 и в 15...30 раз в сравнении с закаленными сталями типа 40X, 50X [17].

Проведен также комплекс исследований по оптимизации состава марганцовистых сталей типа стали Гадфильда [3], а также по разработке режимов обезуглероживающей закалки [2] для дестабилизации аустенита и реализации  $\gamma_{\text{ост}} \rightarrow \alpha'$  ДМПИ. Это обеспечило значительное, в 2...2,5 раза повышение долговечности бил дробилок шихтовых материалов, и может быть рекомендовано для многих других деталей из марганцовистых износостойких сталей.

Экономическую эффективность новых разработанных материалов можно показать на примере внедрения износостойкого экономнолегированного чугуна ЧХ15Г5СТЛ. Расчеты экономической эффективности применения защитных плит из разработан-



а



б

Рис. 6. Микроструктура фильер из стали X12М, закаленной от 1200 °С в масло (отпуск 200 °С): а – до эксплуатации; б – в зоне износа;  $\times 400$

ного чугуна ЧХ15Г5СТЛ, взамен применявшемуся чугуна КЛИЧи стали 110Г13Л, были выполнены для условий работы Аглофабрики ЧАО «ММК им. Ильича». В результате были выявлены следующие направления повышения эффективности:

- снижается себестоимость агломерата с соответствующим эффектом в последующих переделах, что обуславливает дополнительную прибыль;
- капитальные вложения на внедрение практически отсутствуют;
- возрастает длительность межремонтного периода;
- возрастает фондоотдача при неизменной фондовооруженности основных рабочих.

Основные расчетные показатели экономической эффективности от внедрения разработанного чугуна ЧХ15Г5Т приведены в табл. 3.

В целом, годовой экономический эффект от внедрения разработанного чугуна в условиях Аглофабрики ЧАО «ММК им. Ильича» составил более 2,5 млн. долл.

При изменении геометрии поверхности плит из нового чугуна ЧХ15Г5Т на ребристую форму удается снизить их металлоемкость на 20%, что дает дополнительную экономию при сохранении на прежнем уровне износостойкости. Следует заметить, что применение разработанного экономичного чугуна не требует дополнительных капитальных вложений, все технологические процессы осуществляют на имеющемся оборудовании, трудоемкость производства в расчете на единицу продукции остается неизменной. Однако, с учетом приведенных показателей (табл. 3) в расчете на ремонтно-эксплуатационный период она значительно снижается.

Сравнительные показатели экономической эффективности применяющихся и разработанных экономнолегированных материалов разнофункционального применения с эффектом самоупрочнения при эксплуатации приведены в табл. 4.

Из таблицы видно, что все разработанные экономнолегированные сплавы, не содержащие остродефицитных легирующих компонентов, в отличие от остродефицитных аналогов аналогичного применения, отличаются значительно меньшей стоимостью от 220 до 900 долл./т. В результате, разработанные материалы можно рассматривать как серьезную альтернативу применяющимся, благодаря меньшей стоимости, хорошей технологичности и более высоким показателям механических и эксплуатационных свойств.

## Выводы

Обобщены результаты исследований по разработке и использованию экономнолегированных чугунов, сталей, наплавочных материалов и упрочняющих технологий, основанных на формировании метастабильных состояний и деформационных фазовых превращений, что обуславливает эффект деформационного самоупрочнения в процессе эксплуатации.

Показаны широкие возможности формирования метастабильных состояний, обеспечивающих развитие деформационных фазовых превращений и реализацию эффекта самоупрочнения в процессе эксплуатации для повышения комплекса свойств разнофункциональных материалов.

Разработанные экономнолегированные самоупрочняющиеся материалы и наукоемкие технологии показали высокую экономическую эффективность, связанную с экономией остродефицитных и дорогих легирующих элементов (Ni, Mo, V), и перспективу для изготовления и упрочнения ряда быстроизнашивающихся деталей механического оборудования металлургических и машиностроительных предприятий.

По основным показателям технико-экономической эффективности разработанные метастабильные материалы разного функционального применения с эффектом самоупрочнения при эксплуатации значительно превосходят соответствующие остродефицитные аналоги.

Таблица 3

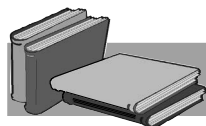
### Показатели экономической эффективности внедрения чугуна ЧХ15Г5Т взамен дорогостоящего чугуна КЛИЧ и стали Гадфильда для производства и эксплуатации футеровочных плит

№ п/п	Показатель	Единица измерения	Величина
1	Экономия дефицитных легирующих элементов (Ni, Mo, V)	%мас.	~1 Ni; ≤ 1 Mo; ≤ 1 V
2	Повышение долговечности плит	раз	3
3	Снижение объема производства плит	раз	3,5
4	Сокращение ремонтно-эксплуатационных расходов (затрат на замену плит)	раз	2
5	Сокращение простоев агломашин: на 1 агломашину на 12 агломашин	суток/год	8...10 96...120
6	Увеличение межремонтного периода: на 1 агломашину на 12 агломашин	мес.	8...10 96...120
7	Повышение производительности: 1 агломашин 12 агломашин	т/час	35,3 423,6
8	Увеличение объема производства агломерата	тыс. тонн/год %	640,0 5,1

## Показатели экономической эффективности применения разработанных экономнолегированных сплавов взамен дорогих дефицитных аналогов

Применяющийся сплав	Разработанный заменитель	Экономия легирующих элементов, %	Снижение стоимости легирующих компонентов, долл./т
износостойкие чугуны			
ИЧХ28Н2МФ	ЧХ12Г4Д2	Cr – 16 Ni – 2 Mo – 0,5 V – 0,5	500...560
ЧХ15Г2МНФТ («КЛИЧ»)	ЧХ15Г5Т	Ni – 1 Mo – 0,5 V – 0,5	420...470
коррозионно-стойкие стали			
12Х18Н10ТЛ	10Х17Г10НДСЛ	Ni – 9	800...860
жаростойкие сплавы			
35Х23Н7СЛ	35Х24Г3СФЛ	Ni – 7	460...500
75Х28Н2СЛ	65Х20Г2С2АЮТЛ	Ni – 2 Cr – 8	200...230
наплавочные материалы			
Св-08Х20Н10Г7СТ	ПП-Нп-20Х12Г9СТ	Ni – 10 Cr – 8	800...850

Примечание: в расчетах использованы ценовые показатели мирового рынка металлов и ферросплавов по состоянию на ноябрь 2016 г.

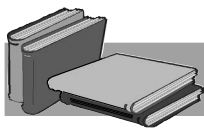


## ЛИТЕРАТУРА

1. Филиппов М. А., Литвинов В. С., Немировский Ю. Р. Стали с метастабильным аустенитом. – М.: Металлургия, 1988. – 256 с.
2. Чейлях А. П. Экономнолегированные метастабильные сплавы и упрочняющие технологии. – Мариуполь: ПГТУ, 2009. – 483 с.
3. Малинов Л. С., Малинов В. Л. Экономнолегированные сплавы с мартенситными превращениями и упрочняющие технологии. – Харьков: ННЦ «ХФТИ», 2007. – 352 с.
4. Чугун: Справочник / Под ред. А. Д. Шермана и А. А. Жукова. – М.: Металлургия, 1991. – 576 с.
5. Износостойкие чугуны с метастабильным аустенитом / А. П. Чейлях, И. М. Олейник, Е. Б. Локшина, А. Н. Лукьянскова. – Металл и литьё Украины. – 1995. – № 1. – С. 30-35.
6. Влияние параметров закалки на структуру и свойства экономнолегированного износостойкого чугуна с метастабильной структурой / А. П. Чейлях, Д. В. Клок, В. В. Климанчук и др. – Металл и литьё Украины. – 2002. – № 7. – С. 33-38.
7. Жаростойкая сталь: патент № 23183 (Украина) МКВ С22С 38/24; // Л. С. Малинов, О. П. Чейлях, О. Ф. Ткачов та ін. – (Украина) № 96083338; Заявл. 23.08.96; Опубл. 15.09.2000. Бюл. № 4.
8. Литый жаростойкий сплав: патент на винахід № 80498 (Украина), МПК С22С 36/28, 38/38, 38/50, 37/06, 37/10; // О. П. Чейлях, С. В. Прекрасний, В. В. Климанчук, П. М. Кирильченко та ін. – (Украина), № а 200604628; Заявл. 25.04.2006; Опубл. 25.09.2007, Бюл. № 15.
9. Чейлях А. П., Гавериленко Г. В. Структура и механические свойства новых безникелевых коррозионностойких сталей аустенитно-ферритного класса // Вестник Приазов. гос. техн. ун-та: Сб. научн. тр. – Мариуполь, 1999, Вып. 8. – С. 76-79.
10. Разработка и исследование новой порошковой ленты для наплавки колес мостовых кранов / Л. С. Малинов, А. П. Чейлях, Е. Я. Харланова и др. // Сварочное производство. – 1995. – № 10. – С. 22-25.
11. Чейлях Я. А., Чейлях А. П., Чигарев В. В. Самоупрочняющиеся износостойкие сплавы: монография. – Мариуполь: ООО «ППРС», 2016. – 264 с.
12. Чейлях Я. А. Структура и свойства наплавленной износостойкой Fe-Cr-Mn стали с регулируемым содержанием метастабильного аустенита / Я. А. Чейлях, В. В. Чигарев // Автоматическая сварка. – 2011. – № 8. – С. 20-24.
13. Федюкин В. К. Термоциклическая обработка металлов и деталей машин / В. К. Федюкин, М. Е. Смагоринский. – Л.: Машиностроение, 1989. – 225 с.
14. Влияние изотермической закалки на количество, стабильность остаточного аустенита и свойства конструкционных сталей / Л. С. Малинов, А. П. Чейлях, Е. Я. Харланова и др. // МитОМ. – 1989. – № 12. – С. 12-16.
15. Чейлях А. П., Малинов Л. С., Лейко Н. Г. Повышение долговечности клапанов из стали 20Х13 скоростной высокотемпературной закалкой // Металлург. и горноруд. пром-сть. – 1993. – № 3. – С. 27-29.



16. Влияние состава и термообработки на структуру и свойства литых хромистых сталей / Л. С. Малинов, А. П. Чейлях, Г. И. Макмак и др. // Изв. ВУЗов. Чер. металлургия. – 1994. – № 11. – С. 43-45.
17. Чейлях А. П., Прекрасный С. В., Щетинин С. Д., Сущенко В. П. Повышение долговечности фильер с использованием метастабильных состояний в хромистых инструментальных сталях // Металл и литьё Украины. – 2003. – № 11-12. – С. 33-34.



## REFERENCES

1. Filippov M. A., Litvinov V. S., Nemirovskii Yu. R. (1988). Stali s metastabil'nym austenitom. [Steel with metastable austenite]. Moscow: Metallurgia, 256 p. [in Russian].
2. Cheiliakh A. P. (2009). Ekonomnolegirovannye metastabil'nye splavy i uprochniaiushchie tekhnologii. [Economically alloyed metastable alloys and the strengthening technologies]. Mariupol': PGU, 483 p. [in Russian].
3. Malinov L. S., Malinov V. L. (2007). Ekonomnolegirovannye splavy s martensitnymi prevrashcheniiami i uprochniyushchie tekhnologii. [Economically alloyed alloys with martensitny transformations and the strengthening technologies]. Kharkov: «KhFTI», 352 p. [in Russian].
4. Sherman A. D., Zhukov A. A. (1991). Chugun: spravochnik. [Cast iron: Reference book]. Moscow: Metallurgia, 576 p. [in Russian].
5. Cheiliakh A. P., Oleinik I. M., Lokshina E. B., Luk'ianskova A. N. (1995). Iznosostoikie chuguny s metastabil'nym austenitom. [Wear-resistant cast irons with metastable austenite]. Kiev: Metall i lit'e Ukrainy, no 1, pp. 30-35. [in Russian].
6. Cheiliakh A. P., Klok D. V., Klimanchuk V. V. et al. (2002). Vliianie parametrov zakalki na strukturu i svoistva ekonomnolegirovannogo iznosostoikogo chuguna s metastabil'noi strukturoi. [Influence of parameters of training on structure and property of economically alloyed wear-resistant cast iron with metastable structure]. Kiev: Metall i lit'e Ukrainy, no 7, pp. 33-38. [in Russian].
7. Pat. 23183 of Ukraine, MKB C22C 38/24. Zharostiika stal'. Malinov L. S., Cheiliakh O. P., Tkach'ov O. F. et al. Zaiavl. 23.08.96, Publ. 15.09.2000, Bul. No 4 [in Ukrainian].
8. Pat. 80498 of Ukraine, МПК C22C 36/28, 38/38, 38/50, 37/06, 37/10. Lytyi zharostiikii splav. Cheiliakh O. P., Prekrasnyi S. V., Klimanchuk V. V., Kiril'chenko P. M. et al. Zaiavl. 25.04.2006, Publ. 25.09.2007, Bul. No 15. [in Ukrainian].
9. Cheiliakh A. P., Gavrilenko G. V. (1999). Struktura i mekhanicheskie svoistva novykh beznikelevykh korrozionnostoikikh stalei austenitno-ferritnogo klassa. [Structure and mechanical characteristics of new nickel-free corrosion resistant steel of austenitic and ferritic class]. Mariupol', no 8, pp. 76-79. [in Russian].
10. Malinov L. S., Cheiliakh A. P., Kharlanova E. Ya. et al. (1995). Razrabotka i issledovanie novoi poroshkovoi lenty dlia naplavki koles mostovykh kranov. [Development and research of a new powder tape for a buildup of wheels of bridge cranes]. Svarchoe proizvodstvo, no 10, pp. 22-25. [in Russian].
11. Cheiliakh Ya. A., Cheiliakh A. P., Chigarev V. V. (2016). Samouprochniaiushchiesia iznosostoikie splavy: monografiia. [The self-strengthened wear-resistant alloys: monograph]. Mariupol', 264 p. [in Russian].
12. Cheiliakh Ya. A., Chigarev V. V. (2011). Struktura i svoistva naplavlennoi iznosostoikoi Fe-Cr-Mn stali s reguliruemym sodержaniem metastabil'nogo austenita. [The structure and properties of the built-up wear-resistant Fe-Cr-Mn steel with the adjustable content of metastable austenite]. Avtomaticheskai svarka, no 8, pp. 20-24. [in Russian].
13. Fediukin V. K., Smagorinskii M. E. (1989). Termociklicheskaia obrabotka metallov i detalei mashin. [Thermal-cycle processing of metals and details of cars]. Leningrad: Mashinostroenie, 225 p. [in Russian].
14. Malinov L. S., Cheiliakh A. P., Kharlanova E. Ya. (1989). Vliianie izotermicheskoi zakalki na kolichestvo, stabil'nost' ostatochnogo austenita i svoistva konstrukcionnykh stalei. [Influence of isothermal training on quantity, stability of residual austenite and property of constructional steel]. MiTOM, no 12, pp. 12-16. [in Russian].
15. Cheiliakh A. P., Malinov L. S., Leiko N. G. (1993). Povyshenie dolgovechnosti klapanov iz stali 20H13 skorostnoj vysokotemperaturnoi zakalkoi. [Increase in a longevity of valves from steel 20X13 by high-speed high-temperature training]. Metallurgicheskai i gornorudnai promyshlennost', no 3, pp. 27-29. [in Russian].
16. Malinov L. S., Cheiliah A. P., Makmak G. I. et al. (1994). Vliianie sostava i termoobrabotki na strukturu i svoistva litykh khromistykh stalei. [Influence of structure and heat treatment on structure and properties of cast chromic steel]. Izvestiia vuzov, Chernai Metallurgia, no 11, pp. 43-45. [in Russian].
17. Cheiliah A. P., Prekrasnyi S. V., Shchetinin S. D., Sushchenko V. P. (2003). Povyshenie dolgovechnosti fil'er s ispol'zovaniem metastabil'nykh sostoyaniji v khromistykh instrumental'nykh staliakh. [Increase in a longevity of spinnerets with use of metastable states in chromic instrumental steel]. Kiev: Metall i lit'e Ukrainy, no 11, pp. 33-34. [in Russian].

## Анотація

Чейлях Я. О., Цуркан М. Л., Чейлях О. П.

Функціональні матеріали і технології з ефектом самозміцнення при експлуатації та їх економічна ефективність

*Узагальнено функціональні матеріали: зносостійкі, корозійно-жаростійкі, конструкційні, інструментальні, наплавлювальні та технології їх зміцнення, рекомендовані для швидкозношуваних деталей механічного обладнання металургійних підприємств. Вони засновані на принципі створення і використання метастабільних станів, що забезпечують реалізацію деформаційних фазових перетворень при випробуваннях і експлуатації, що обумовлює ефекти самоадаптації і самозміцнення в процесі служби виробів. Показано високу їх економічну ефективність для заміни дорогих аналогів.*

## Ключові слова

Сталі, чавуни, метастабільність, аустеніт, мартенсит, самозміцнення, зносостійкість, економічна ефективність.

## Summary

*Cheylyakh Ya., Tsurkan M., Cheylyakh O.*

Functional materials and technologies with self-strengthening effect at operation and their cost-effectiveness

*Functional materials: wear-resistant, corrosion-resistant, heat resistant, structural, tool, hardfacing and strengthening technologies are generalized and recommended for wearing parts of mechanical equipment of metallurgical enterprises. They are based on the principle of the creation and use of metastable states, ensuring the implementation of the deformation induced phase transformations during testing and operation, which makes the effects of self-adaptation and self-strengthening in the life of products. Their high cost-efficiency for replacement of expensive counterparts has been demonstrated.*

## Keywords

Steels, cast irons, metastability, austenite, martensite, selfstrengthening, wear-resistance, cost-effectiveness.

Поступила 25.11.16