

Л. П. Клименко, О. Ф. Прищепов, В. И. Андреев, О. В. Щесюк, А.И. Случак

## ПОВЫШЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЧУГУННЫХ ДЕТАЛЕЙ ДВС МЕТОДОМ КОМПЛЕКСНОГО ЛЕГИРОВАНИЯ

В статье приведены результаты длительных исследований по получению лигатур для серого и высокопрочного чугуна, применяемых для отливки ключевых деталей двигателей внутреннего сгорания. Основной целью исследования является продление срока эксплуатации деталей ДВС путем повышения износостойкости основных деталей (гильз цилиндров и поршневых колец). Цель исследования заключается в разработке лигатуры и технологии для серых и высокопрочных чугунов. Методы исследования включали как математическое моделирование путем регрессионного анализа матриц Грама, сформированных на основе определенных коэффициентов корреляции между износостойкостью чугуна и его химическим составом, что было проверено через критерий Фишера, так и практические исследования по отливке чугунов различных марок и стендовых испытаний двигателей с деталями на их основе. Уравнение регрессии, характеризующей оптимальный химический состав чугуна представлено как  $I = 8,4 + 0,9C - 0,6Si - 3,2Mn - 84,4P - 4,5Ti - 33,8S + 9,3Cr + 0,4Ni - 5,9Si - 1,1V + 24,3Mo$ . Основой для разработок стал анализ достаточного количества литературных источников, связанных с легирующими свойствами различных элементов при применении их в серых и высокопрочных чугунах. Основные результаты литературного поиска представлены в соответствующем разделе, где охвачено легирование никелем, хромом, молибденом, ванадием, медью, кремнием, титаном и другими элементами. Были разработаны и защищены патентами Украины №25099 и №25100 высокоэффективные лигатуры для чугунов деталей цилиндро-поршневой группы (ЦПГ). Стендовые испытания износостойкости полученных чугунов показали, что формирование сорбитообразного перлита за счет легирования чугуна в ковше является оптимальным подходом, в комплексе с другими мерами может значительно повысить качество полученных деталей. Таким образом исследование показали, что для высоконагруженных деталей цилиндно-поршневой группы неизбежен переход на легированные чугуны. Для чугунов для втулок цилиндров дизелей типа ЧН 25/34 это связано с их переходом на высокозернистые топлива, а работа новых форсированных двигателей 6ЧН 26/34 без легированных чугунов оказалась невозможной.

**Ключевые слова:** двигатели внутреннего сгорания; экологическая безопасность; ресурс; поршни; кольца; цилиндры; техническое состояние; лигатура; чугун.

### Введение

Двигатель внутреннего сгорания – наиболее распространенный тип тепловой машины, главным преимуществом которой, по сравнению с другими, является экономичность. ДВС используется как на транспорте, так и в стационарных условиях. Автомобильный, железнодорожный, морской, речной и авиационный транспорт оснащаются разными типами ДВС, причем наибольшее распространение они получили на автомобилях и судах, чуть меньшее – на железнодорожном транспорте в связи с его электрификацией. По оценке специалистов фирмы „Mercedes-Benz” в настоящее время на земном шаре количество единиц автотранспорта составляет примерно 1 млрд. и годовое потребление нефти на его нужды превышает  $2 \times 10^9$  т, воздуха – свыше  $20 \times 10^9$  т [1,2].

Эксплуатация ДВС сопровождается мощным негативным воздействием на природу. Преобразование химической энергии топлива в работу по перемещению грузов и пассажиров или в электрическую энергию связано с образованием токсических и вредных веществ с отработавшими газами двигателей, а также потребление в больших объемах моторного топлива и масла.

Отработавшие газы ДВС содержат около 200 компонентов. Период их существования длится от нескольких минут до 4-5 лет [1,2].

К мероприятиям, повышающим ресурс и экологическую безопасность ДВС, можно отнести организационные, конструкторско-технические, эксплуатационные и технологические. Последние занимают достойное место в решении данной проблемы.

Ресурс двигателя, который зависит от износостойкости его основных деталей, будет также определять экологическую безопасность ДВС, повышая ее [3]. Таким образом, применение новых материалов, технологий их получения, в том числе использование специальных лигатур, дадут возможность заметно улучшить механические свойства чугунов и их износостойкость.

### Анализ литературных данных и постановка проблемы

Ученые, занимающиеся износом чугунов, отмечают положительное влияние легирования чугуна никелем, хромом, молибденом, ванадием, медью и другими элементами, а также модифицирование магнием, иттрием и церием [4,5,6].

Влияние химических элементов на износостойкость чугуна, отраженное в компетентных источниках, изучено нами на достаточно высоком уровне [7].

Кремний при малых количествах (до 1,25%) приводит к снижению количества цементита и увеличению износа. Повышение содержания кремния

(от 1,25% до 1,85%) приводит к увеличению количества графита и некоторому укрупнению, утолщению его пластин, что благоприятно сказывается на износостойкости. Дальнейшее увеличение содержания кремния приводит к образованию свободного феррита, что резко снижает износостойкость. Для чугунов, легированных хромом и молибденом, максимальное количество кремния может быть увеличено без опасности снижения износостойкости.

**Фосфор** в сером чугуне, как правило, увеличивает износостойкость. Оптимальное количество фосфора зависит от вида износа и материала сопрягающейся детали. При работе чугуна по чугуну содержание фосфора обычно не превышает 0,45-0,75%. При работе серого чугуна по стали содержание фосфора следует увеличить до 0,75-0,85%. Дальнейшее увеличение содержания фосфора сильно увеличивает хрупкость чугуна и отрицательно сказывается на износостойкости и надёжности трущейся пары. Наиболее благоприятно фосфор сказывается при образовании двойной фосфидной эвтектики, равномерно расположенной в металлической матрице.

**Марганец** повышает износостойкость чугуна при увеличении его содержания до 1,6%. Действие его заключается в сорбитизации перлита и стабилизации структуры. Дальнейшее увеличение содержания марганца повышает хрупкость чугуна и способствует увеличению износа. Количество марганца в чугуне для втулок цилиндров дизелей, особенно отлитых центробежным способом, обычно не превышает 0,9-1,2%, что объясняется сильным отбелом заготовки на наружной поверхности, затрудняющим механическую обработку.

**Сера** влияет на износ чугунов по-разному. В ряде работ указывается на положительное влияние серы на износ при трении. Однако при этом отмечается повышение хрупкости и краснотомкости, уменьшение жидко-текучести, образование местного отбела и газовых раковин. Ограничивается количество серы в чугунах втулок цилиндров до 0,12%, а для чугунов, модифицированных иттрием, содержание серы не должно превышать 0,03%.

**Никель** уменьшает количество карбидов и увеличивает твёрдость чугуна, снижает окисляемость и повышает его износостойкость. Никель также стабилизирует цементит перлита и сорбитизирует его. В то же время никель диспергирует графит, что отрицательно сказывается на износостойкости. Применение никеля в больших количествах затруднено из-за его высокой стоимости и дефицитности.

**Хром** увеличивает количество карбидов в чугуне, способствует образованию перлита и сложных твёрдых карбидов. Хром заметно повышает износостойкость с содержанием его в чугуне до 0,75%, при более высоком его содержании выпадают сложные карбиды, при этом ухудшается обрабатываемость и увеличивается хрупкость чугуна. Наиболее целесообразно введение хрома совместно с никелем, они взаимно нейтрализуют вредное влияние друг друга и усиливают благоприятное воздействие.

**Молибден** значительно улучшает износостойкость чугуна. Его действие аналогично совместному влиянию никеля и хрома. Молибден улучшает износостойкость чугуна при повышенных температурах, что особенно важно для деталей ЦПГ. Благоприятное действие молибдена на износостойкость объясняется образованием комплексных карбидов, упрочняющих перлит, измельчением перлита и образованием более грубых включений графита. Широкое применение молибдена сдерживается его высокой стоимостью.

**Медь** выравнивает и немного повышает твёрдость чугуна. Действие её аналогично действию никеля. В настоящее время медью заменяют часть никеля. Благоприятное влияние меди объясняется смазывающим действием её субмикроскопических частиц и возможностью установления режима избирательного переноса при трении. Оптимальным количеством меди в чугуне следует считать 0,5-0,7%, при большем её количестве, вследствие диффузии её с графитовым включением и ослаблением этим металлической основы, происходит снижение износостойкости чугуна.

**Ванадий** сорбитизирует перлит и повышает способность чугуна противостоять износу. Особенно благоприятно его действие при введении совместно с хромом, никелем и титаном. Происходит улучшение перлита и образование мелкодисперсных включений карбидов хрома и ванадия.

**Титан** измельчает графит, ухудшая износ с одной стороны, но оказывает положительное влияние на металлическую основу чугуна вследствие раскисляющего действия и повышения плотности металла с другой стороны.

Положительное влияние на структуру и свойства чугуна оказывает модифицирование иттрием и церием. Путём огрубления включений графита значительно повышается сопротивление чугуна износу при трении скольжения.

Из приведённых данных можно заключить, что все элементы, применяемые в настоящее время для легирования чугуна, в большей или меньшей

степени повышают его износостойкость за счёт сорбидизации перлита, его упрочнения, образования карбидов и воздействия на форму и размер графитовых включений.

К недостаткам легирования чугуна втулок цилиндров ДВС следует отнести:

1) повышенный расход материалов, так как легирующие элементы распространяются во всём объёме детали, а износу подвергаются только рабочие поверхности;

2) для ввода легирующих элементов в чугун требуется большой разогрев расплава, что невозможно в условиях ваграночного производства, а при выплавке в электропечах, вследствие высокого перегрева, чугун имеет мелкозернистую структуру, что отрицательно сказывается на его износостойкости. Кроме того, возможен угар некоторых легирующих элементов.

На двигателестроительных заводах и заводах по производству деталей ДВС с серийным и массовым типом производства часто используется ваграночная выплавка чугуна. Непосредственно в вагранке получение комплекснолегированного чугуна затруднено. Его получают путём вторичного разогрева в индукционных печах и ввода легирующих элементов.

Однако перспективным и рациональным способом легирования чугуна является легирование чугуна в ковше [8].

#### Цель и задачи исследований

Цель работы: Повышение износостойкости основных деталей ДВС.

Задачи исследований:

1. Разработка и технология получения лигатуры для серого чугуна.
2. Разработка и технология получения лигатуры для высокопрочного чугуна.

#### Методы исследований

При исследовании использовался опыт эксплуатации различных видов двигателей внутреннего сгорания, разработка технологий, направленных на повышение ресурса основных деталей ДВС [9], проведение ремонтно-профилактических работ с автомобильными двигателями, а также проработка большого числа литературных источников.

Оценка зависимостей между признаками и степенью влияния каждого химического элемента на износостойкие свойства чугунов давалась на основе методов парной корреляции. В первом приближении с учетом наибольших комбинаций состава легирующих элементов прямолинейный характер линии регрессии дал основание искать

уравнение регрессии в виде линейной зависимости. Коэффициент корреляции определяет меру тесноты линейной связи. Анализ парных коэффициентов корреляции позволяет установить линейную связь механических и износостойких свойств чугунов с их химическим составом. Обработка опытных данных включала в себя следующие операции:

- определение коэффициента корреляции свойств и химического состава чугуна;
- определение коэффициента регрессии из матрицы Грама методом наименьших квадратов;
- проверка адекватности модели с помощью критериев;
- оптимизация химического состава чугуна для обеспечения оптимальной износостойкости.

Адекватность модели подтверждена высоким значением критерия Фишера ( $COCB = 0,4716$ ). Коэффициенты в уравнении регрессии значимые. Допущение о линейном характере уравнения множественной регрессии подтверждается высокой схожимостью расчетных и экспериментальных данных.

Оптимизация уравнения регрессии позволила определить среднее значение содержания легирующих элементов в чугуне, обеспечивающих наилучшую износостойкость:

C – 3,2 %; Si – 2,0%; Mn – 0,8 %; P – 0,1 %;

S – 0,05 %; Cr – 0,52 %; Ni – 0,30 %;

Cu – 0,65 %; V – 0,1 %; Mo – 0,35 %; Ti – 0,15 %.

Расчетное значение величины износа чугуна данного химического состава составляет 4,9 мкм за  $600 \cdot 10^3$  циклов при испытании по схеме “ролик – колодка” при давлении 8 МПа и скорости скольжения 1 м/с. С учетом колебаний состава элементов в чугуне получены пределы содержания элементов. С целью подтверждения результатов расчетов проведен ряд опытно-промышленных плавов, а также проведены износостойкие испытания полученных чугунов. Результаты испытаний близки к расчетным, что свидетельствует об адекватности разработанной математической модели износостойкости реальным процессам трения (табл. 1).

Таблица 1. Результаты испытания износостойкости чугунов плавов № 15-19

Наименование	Номер плавки					
	15	16	17	18	18	19
Расчетное значение износа, мкм	5,3	5,4	5,6	5,7	5,75	4,03
Износ опытного чугуна, мкм	6,9	5,0	5,6	5,4	6,0	4,0

В результате обработки эмпирических данных износа чугунов плавов 15-19 с помощью методов

математической статистики получена матрица парных коэффициентов корреляции химических элементов в чугунах.

Рассчитано уравнение регрессии зависимости износа чугуна от его химического состава:

$$I = 8,4 + 0,9C - 0,6Si - 3,2Mn - 84,4P - 4,5Ti - 33,8S + 9,3Cr + 0,4Ni - 5,9Cu - 1,1V + 24,3Mo. \quad (1)$$

По приведенному уравнению рассчитан износ чугунов в зависимости от их химического состава [10], показавший хорошую сходимость с результатами эксперимента.

### Результаты исследования

В результате проведенного большого объема научно-исследовательских работ [6,7,8,9,10,11, 12, 13] авторами была разработана и получена лигатура следующего состава, %:

Таблица 2. Состав лигатуры для чугуна СЧ 25

Медь	35-40	Кальций	0,2-1,5
Кремний	15-20	Молибден	2-4
Марганец	6-10	Ванадий	1,5-2,5
Фосфор	5-8	Титан	1,5-2,0
Хром	5-7	Иттрий	0,05-0,15

Лигатура выплавлялась в индукционной печи марки ИЛТ-1 путём сплавления меди фосфористой, кремния металлического, феррохрома, ферромolibдена, феррованадия, ферротитана, иттрия, кальция. Выплавка производилась при температуре 1540-1550°C. Температура проверялась термопарой погружения группы III. Разливка осуществлялась слоем 10-15 мм на песчано-глинистую подушку. После чего лигатура дробилась на гранулы 10-12 мм. Перед подачей лигатуры на жёлоб вагранки она нагревалась до 750-800. Температура плавления лигатуры 1220-1240°C. Лигатура вводится в количестве 1,5% по весу от жидкого чугуна при его температуре 1390-1430°C.

В таблице 3 показаны химические составы и механические свойства серийного чугуна СЧ25 и чугунов, полученных при использовании лигатуры.

Были проведены стендовые испытания дизеля 6ЧН 25/34 с цилиндрическими втулками, изготовленными из комплекснолегированного серого чугуна с применением разработанной лигатуры [7]. Испытания показали повышение ресурса дизеля на 30-35%. Для проведения широких эксплуатационных испытаний по разработанной технологии было отлито 210 качественных втулок цилиндров. Брак составил 1,8% против 8% при отливке без использования лигатуры. Микроструктура чугуна приведена на рис. 1.

Таблица 3. Химические составы и механические свойства серийного чугуна СЧ 25 и чугунов, полученных при использовании лигатуры

Название элемента	Содержание элементов, мас. %	
	СЧ 25	Чугуны, полученные с применением лигатуры
Углерод	3,14	2,93-3,06
Кремний	2,14	1,52
Марганец	0,78	0,73
Хром	0,25	0,12-0,89
Никель	0,10	Следы
Молибден	–	0,20
Медь	–	0,56-0,63
Ванадий	–	0,07-0,10
Титан	–	0,2-0,3
Фосфор	0,20	0,14-0,17
Сера	0,10	0,098-0,11
Прочность $\sigma_b$ , МПа	260	299-310
Твёрдость НВ	192	223
Износ образцов за 20 часов, мкм	9,2	7,2-7,6

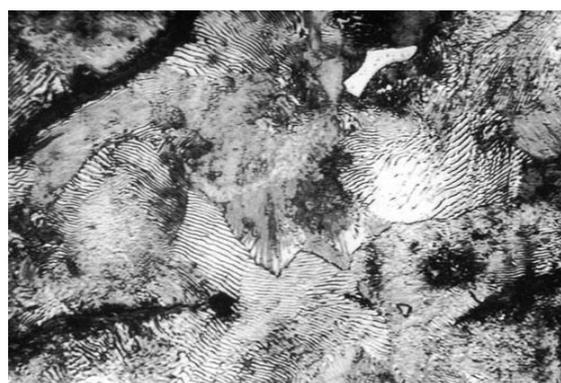


Рис.1. Микроструктура чугуна СЧ25 для втулок дизелей ЧН 25/34, x400

Мелкопластинчатый или сорбитообразный перлит с равномерно распределенным графитом (тонко- и среднепластинчатым, завихренным или прямолинейным) и фосфидной эвтектикой в виде мелких, равномерно распределенных включений. Включения эвтектического графита (точечного графита, графита переохлаждения) допускаются не более 5 % площади шлифа.

Лигатура внедрена на заводе «Первомайскидзельмаш».

К дальнейшему развитию комплексного легирования чугуна для гильз цилиндров ДВС следует отнести разработку лигатуры, обеспечивающей получение серого чугуна не только с повышенной износостойкостью, но и с возможностью эффективного создания рабочих поверхностей с пере-

менной износостойкостью. Для этого в состав лигатуры вводится сурьма, оказывающая сорбитообразующее действие на перлит металлической основы. Именно сорбит различной дисперсности по длине отливок даёт наилучшие результаты при получении дифференцированной износостойкости. Разработанная лигатура [11] защищена Патентом Украины № 25099 от 25.07.2007 и имеет следующий химический состав, мас. %:

Таблица 4. Состав лигатуры для втулок дизелей ЧН 25/34,х400

Медь	25-30	Молибден	2-4
Кремний	12-16	Ванадий	1,5-2,0
Марганец	6-10	Титан	1,5-2,0
Фосфор	5-8	Иттрий	0,05-0,15
Хром	5-7	Сурьма	13-14
Кальций	0,2-1,0	Железо	остальное

В таблице 5 приведен химический состав чугуна, полученный при использовании разработанной лигатуры:

Таблица 5. Химический состав чугуна, полученный с применением лигатуры

Состав, мас. %						
C	Si	Mn	Cr	Mo	V	Fe
3,20	1,75	1,33	0,86	0,12	0,05	Остальное
Ti	Y	Sb	P	S	Cu	
0,03	следы	0,22	0,103	0,11	0,47	

Технология выплавки и ввода лигатуры в расплав чугуна соответствует описанию, приведённому выше.

Многие детали ДВС, от надёжности и долговечности которых зависят технико-экономические и экологические параметры работы двигателя, изготавливаются из высокопрочных чугунов. К ним, в первую очередь, необходимо отнести поршневые кольца (например, первое компрессионное кольцо автомобильных двигателей и все кольца среднеоборотных дизелей). Износ поршневых колец оказывает доминирующее влияние на совершенство цикла работы ДВС и, как следствие, на выбросы загрязняющих веществ в окружающую среду. В связи с этим, актуальной проблемой является совершенство материалов поршневых колец.

Направляющие втулки клапанов, состояние которых влияет на экологические параметры, также в ряде случаев изготавливаются из высокопрочного чугуна.

С целью повышения стойкости против коррозионно-механического износа и термоупругости высокопрочного чугуна поршневых колец была разработана лигатура, защищённая Патентом

Украины № 25100 от 25.07.2007. Лигатура [12] имеет следующий химический состав, мас. %.

Таблица 6. Лигатура для высокопрочного чугуна

Лигатура для серийного чугуна ВЧ 50-1,5 Медь	25-30	Ванадий	4-5
Кремний	5-7	Никель	10-12
Хром	2-3	Редкоземельные металлы	0,1-2
Фосфор	8-10	Сурьма	13-14
Молибден	12-14	Железо	остальное

Медь измельчает и упрочняет перлит механической основы, способствует установлению режима избирательного переноса. Кремний необходим для вторичной модификации высокопрочного чугуна и образования графита оптимальной формы и размера. Хром способствует образованию сложных карбидов и повышению гетерогенности структуры. Фосфор необходим для получения в чугуне двойной фосфидной эвтектики, улучшения жидкотекучести чугуна при некотором снижении температуры металла при вводе лигатуры и для повышения хрупкости лигатуры. Молибден и никель необходимы для повышения стойкости чугуна к продуктам сгорания сернистого топлива и термоупругости колец. Ванадий производит раскисляющее действие и повышает плотность отливки. Редкоземельные металлы (РЗМ) дополнительно модифицируют чугун и повышают его механические свойства. Сурьма оказывает сорбитообразующее действие на перлит металлической основы и повышает износостойкость чугуна.

Ввод этих элементов позволяет получить высокопрочный чугун с оптимальной формой графитовых включений, высокоизносостойкой и коррозионностойкой металлической матрицей, что обеспечивает чугуну высокую работоспособность в условиях коррозионно-механического износа.

Лигатура выплавляется в индукционных печах марок МГП-102 или ИЛТ-1 путем последовательного введения меди фосфористой, никеля, феррохрома, феррованадия, ферромolibдена, кремния, металлической сурьмы и РЗМ (перед выпуском). Разливка расплава лигатуры осуществляется слоем 10-15 мм на песчано-глинистую подушку. После застывания лигатуры дробится на гранулы 10-12 мм. Перед вводом в чугун лигатура подогревается до температуры 750-800°C и подаётся на жёлоб вагранки. После заполнения ковша чугун подвергается модифицированию в автоклаве магнием. Температура плавления лигатуры 1220-1240°C. Температура чугуна на выпуске из вагранки 1390-1430°C. Лигатура вводится в количестве

1,5% по массе от жидкого чугуна. Усваивается 95-100% лигатуры за счёт достаточного времени выдержки чугуна в автоклаве, подогрева лигатуры перед вводом, её легкоплавкости и высокой температуры чугуна на выпуске из вагранки.

В таблице 7 приведены химические составы и механические свойства серийного чугуна ВЧ 50-1,5 и высокопрочных чугунов, полученных с применением лигатуры.

Микроструктура чугуна поршневых колец приведена на рис. 2.

Таблица 7. Химический состав и механические свойства серийного чугуна ВЧ 50-1,5 и высокопрочных чугунов, полученных с применением лигатуры

Название элемента	Содержание элементов, мас. %	
	ВЧ 50-2	Высокопрочные чугуны с применением лигатуры
Углерод	3,36	3,41-3,53
Кремний	2,39	2,47-2,63
Марганец	0,70	0,69-0,72
Хром	0,20	0,22-0,27
Никель	–	0,15-0,21
Молибден	–	0,14-0,21
Медь	0,37	0,49-0,62
Ванадий	–	0,04-0,07
Фосфор	0,08	0,09-0,11
Сера	0,017	0,015-0,012
Редкоземельные металлы	–	0,005-0,03
Сурьма	–	0,18-0,22
Механические свойства	ВЧ 50-1,5	Высокопрочные чугуны с применением лигатуры
Прочность $\sigma_{в}$ , МПа	101	102-112
Твёрдость НВ	510	550-570
Износ образцов за 20 часов, мкм	9,6	8,2-8,5



Рис. 2. Микроструктура высокопрочного чугуна ВЧ50-1,5 для поршневых колец дизелей ЧН 25/34, x 600

В качестве примера рассмотрим опыт эксплуатации двигателя ЧН 25/34.

Повышение степени газотурбинного наддува снижает надежность втулки (понижается износостойкость), наработка на отказ составила 8500 часов.

У цилиндрических втулок двигателя 6ЧН 25/34 встречаются повышенные износы через 2000 - 3000 часов работы. Интенсивность изнашивания доходит до 0,25 мм за 1000 часов. Выработка за 6000 часов достигает 1,5...2 мм при максимально допустимом износе 1,8 мм на диаметр. Наибольший износ втулок наблюдается в районе ВМТ в плоскости качания шатуна. Средняя скорость изнашивания в районе ВМТ равна 0,012 мм за 1000 часов.

### Выводы

Проведенный анализ и экспериментальные работы по проблеме повышения ресурса деталей ЦПГ современных двигателей, говорят о неизбежности перехода от нелегированного серого чугуна для втулок цилиндров дизелей типа ЧН 25/34 к комплексно-легированному, связанному, в первую очередь, с форсировкой двигателя и переходом на тяжелое высокосернистое топливо. Работа нового форсированного дизеля 6ЧН 26/34 со втулками из нелегированного чугуна оказалась просто невозможной в связи с их низкой стойкостью.

Проведенные исследования позволили получить лигатуры для серых и высокопрочных чугунов, которые имеют улучшенные износостойкость и другие механические свойства, а также такие детали, как втулки цилиндров, с переменной износостойкостью. Разработаны химические составы лигатур и чугунов, а также технологии их получения. Применение вышеуказанных разработок позволили повысить ресурс двигателей 6ЧН 25/34 в среднем на 25%, а также повысить их экологическую безопасность.

### Список литературы:

1. Промышленно-транспортная экология: уч. Для вузов / Под. Ред В.Н. Луканина – М.: Высшая школа, 2001. – 273 с.
2. Павлова Е.И. Экология транспорта: Учебник для вузов / Е.И. Павлова. – М.: Транспорт, 2000. – 248 с.
3. Кондратенко Ю. Импульсно-фазовая система управління стабілізацією температури термоакустичної моделі двигуна, що управляється енергією відпрацьованого тепла. / Кондратенко Ю., Коробко В., Коробко О., Герасин О. // Матеріали 8-ї Міжнародної конференції IEEE 2015 з питань інтелектуального збору даних та передових обчислювальних систем: технології та застосування, IDAACS 2015. – Том. 1. – С. 58-61.
4. Вудман Н. Технические сплавы / Вудман, Норман Эмм и Роберт С. Гиббонс. – Нью-Йорк: Ван Ностранд Рейнгольд, 1973.
5. Уайтман К. Металлы и сплавы. Ресурсы сегодня / Уайтман, Кэтрин, Луиза Неветт и Саймон Бишоп.. Нью-Йорк:

Глостер Пресс, 1988. 6. Бодсворд К. Физическая химия производства железа и стали / Бодсворд Колин, Генри Бредли-Белл. – Лондон: Лонгмен, 1972. 7. Клименко Л.П., Медведев М.А., Прищепов О.Ф., Новосельцев М.И. Работка и исследование влияния химсостава и технологии изготовления втулок цилиндров, поршневых колец, направляющих втулок клапанов и крышек цилиндров дизелей ЧН 26/34 // Отчет о НИР (заключительный), Николаевский кораблестроительный институт. – № 5.1. Пр. 665. – Николаев, 1984. 8. Гименез С. Роль химического износа при обработке материалов на основе железа сверхпрочными инструментальными материалами из PCD и PCBN / С. Гименез, О. Ван дер Бист, Дж. Влейгелз // Алмаз и связанные материалы. – 2007. – №16. – С. 435-445. 9. Мнацаканов, Р. Г. Моделивання інтенсивності зношування / Мікосянчик, О. О.; Мнацаканов, Р. Г.; Хімко, М. С. // Проблеми тертя та поверхонь. – 2015. – Том. 1, № 66. – С. 140-145. 10. Медведев М.А., Клименко Л.П., Барвинок В.А., Комаров В.А. Исследование влияния легирующих элементов в чугунах при работе пары поршневого кольца-втулка цилиндра // Отчет о НИР (заключительный), Николаевский кораблестроительный институт. – № 12.1. Пр. 575; № гос. рег. 78030793. – Николаев: НКИ, 1980. – 131 с. 11. Патент України на корисну модель № 25099. Лігатура для сірого чавуну / Клименко Л.П., Прищепов О.Ф. – Заявл. 23.03.2007; Опубл. 25.07.2007. – Бюл. № 11. 12. Патент України на корисну модель № 25100. Лігатура для високоміцного чавуну / Клименко Л.П., Прищепов О.Ф. – Заявл. 23.03.2007; Опубл. 25.07.2007. – Бюл. № 11. 13. Фізико-технологічні основи виробництва металів [Текст]: навч. посібник. / Нац. трансп. ун-т; [уклад.]: М. Ф. Дмитриченко [та ін.]. – К.: НТУ, 2010. – 168 с.

#### **Bibliography (transliterated):**

1. Lukanina, V.N. (2001), *Industrial and transport ecology: sci. For high schools [Promyishlenno-transportnaya ekologiya: uch. Dlya vuzov]*, Higher school, Moscow, pp. 273. 2. Pavlova, E.I. (2000), *Transport Ecology: Textbook for high schools.*, M. [Pavlova E.I. Ekologiya transporta: Uchebnik dlya vuzov] Transport, pp. 248. 3. Kondratenko Y., Korobko V., Korobko O., Gerasin O. (2015) *Pulse-*

*phase control system for temperature stabilization of thermoacoustic engine model driven by the waste heat energy. [Impulsno-fazova sistema upravlinnya stabilizatsiyeyu temperatury termoakustychnoyi modeli dvyhuna, shcho upravlyayetsya enerhiyeyu vidpratovanoho tepla]* Proceedings of the 2015 IEEE 8th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications, IDAACS 2015, Vol. 1, pp. 58-61. DOI: 10.1109/IDAACS.2015.7340701. 4. Woldman, Norman Emme, and Robert C. Gibbons. (1973). *Engineering Alloys*. New York: Van Nostrand Reinhold. 5. Whyman, Kathryn, Louise Nevett, and Simon Bishop. 1988. *Metals and Alloys. Resources Today*. New York: Gloucester Press. 6. Bodsworth, Colin, and Henry Bradley Bell, (1972) *Physical Chemistry of Iron and Steel Manufacture*. London: Longman. 7. Klimenko, L.P., Medvedev, M.A., Pryshepov, O.F., Novoseltsev, M.I. (1984) *Development and research of the influence of chemical composition and technology of the manufacture of bushings of cylinders, piston rings, guide sleeves of valves and caps of cylinders of diesel engines ChN 26/34 [Razrabotka i issledovanie vliyaniya himsostava i tehnologii izgotovleniya vtuok tsilindrov, porshnevyyh kolets, napravlyayuschih vtuok klapanov i kryishek tsilindrov dizeley ChN 26/34: Otchet o NIR (zaklyuchitelnyy), Nikolayev shipbuilding institute, No. 5.1. Pr 665. - Nikolayev. 8. S. Gimenez, O. Van der Biest, J. Vleugels, (2007) The role of chemical wear in machining iron based materials by PCD and PCBN superhard tool materials, *Diamond and Related Materials*, 16, 435-445. 9. Mnatsakanov, R., G., Mikosiyanchik, O., O., Khimko, M., S., (2015) *Modeling of wear intensity. [Modelyuvannya intensyvnosti znoshuvannya]* Problems of Friction & Wear., Vol. 1 Issue 66, p.140-145. 10. Medvedev, M.A., Klymenko, L.P., Barvinok, V.A., Komarov, V.A. (1980) *Investigation of the influence of alloying elements in cast iron during operation of a pair of piston ring-sleeve of a cylinder [Issledovanie vliyaniya legiruyuschih elementov v chugune pri rabote paryi porshnevoe koltso-vtulka tsilindra]* Report on NIR (final), Nikolayev Shipbuilding Institute: No. 12.1. Pr 575; State gos. Reg. 78030793., Nikolayev: NUS, pp. 131. 11. Klymenko L.P., Pryshepov O.F., MSUU of Petro Mohyla 2007. *Ligature for gray cast iron [Ligatura dlya sirogo chavunu]* Ukraine Patent of Utility Model No. 25099. 12. Klymenko L.P., Pryshepov O.F., MSUU of Petro Mohyla 2007. *Ligature for high-strength pig iron. [Ligatura dlya visokomitnogo chavunu]* Ukraine Patent of Utility Model No. 25100. 13. M. F. Dmitrichenko., (2010) *Physical and technological bases of metal production: teaching. manual. [Fiziko-tehnologichni osnovy vyrobnytstva metaliv]* National trans un-t, K.: NTU, 168 p.*

Поступила в редакцию 24.06.2019 г.

**Клименко Леонид Павлович** - доктор техн. наук, профессор, ректор, Черноморский национальный университет имени Петра Могилы, e-mail: rector@chmnu.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-3458-9453>.

**Прищепов Олег Федорович** - кандидат техн. наук, доцент, кафедра автоматизации и компьютерно-интегрированных технологий, Черноморский национальный университет имени Петра Могилы, г. Николаев, Украина, e-mail: priof@ukr.net.

**Андреев Вячеслав Иванович** - кандидат техн. наук, доцент, кафедра экологии и природоиспользования, Черноморский национальный университет имени Петра Могилы, г. Николаев, Украина, e-mail: avi@chmnu.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0003-1143-8043>.

**Шесюк Олег Владимирович** кандидат техн. наук, доцент, кафедра автоматизации и компьютерно-интегрированных технологий, Черноморский национальный университет имени Петра Могилы, г. Николаев, Украина, e-mail: taifun.kv@gmail.com.

**Случак Александр Игоревич** – аспирант, Черноморский национальный университет имени Петра Могилы, г. Николаев, Украина, e-mail: sl4ok@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5051-0648>.

#### **ПІДВИЩЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЧАВУНИХ ДЕТАЛЕЙ ДВЗ МЕТОДОМ КОМПЛЕКСНОГО ЛЕГУВАННЯ**

**Л. П. Клименко, О. Ф. Прищепов, В. І. Андреев, О. В. Шесюк, О. І. Случак**

В статті наведено результати довготривалих досліджень з отримання лігатур для сірого та високоміцного чавуну, що застосовуються для відливки ключових деталей двигунів внутрішнього згоряння. Основною метою дослідження є продовження терміну експлуатації деталей ДВЗ шляхом підвищення зносостійкості основних деталей (гільз циліндрів та

поршневих кілець). Ціль дослідження полягає в розробці лігатури та технології для сірих та високоміцних чавунів. Методи дослідження включали як математичне моделювання шляхом регресійного аналізу матриць Грама, сформованих на основі визначених коефіцієнтів кореляції між зносостійкістю чавуну та його хімічним складом, що було перевірено через критерій Фішера, так і практичні дослідження з відливки чавунів різних марок та стендових випробувань двигунів з деталями на їх основі. Рівняння регресії, що характеризує оптимальний хімічний склад чавуну представлено як  $I = 8,4 + 0,9C - 0,6Si - 3,2Mn - 84,4P - 4,5Ti - 33,8S + 9,3Cr + 0,4Ni - 5,9Cu - 1,1V + 24,3Mo$ . Основою для розробок став аналіз достатньої кількості літературних джерел, пов'язаних з легуючими властивостями різних елементів при застосуванні їх в сірих та високоміцних чавунах. Основні результати літературного пошуку представлено в відповідному розділі, де охоплено легування нікелем, хромом, молібденом, ванадієм, міддю, кремнієм, титаном та іншими елементами. Було розроблено та захищено патентами України №25099 та №25100 високоефективні лігатури для чавунів деталей циліндро-поршневої групи (ЦПГ). Стендові випробування зносостійкості отриманих чавунів продемонстрували, що формування сорбітоподібного перліту за рахунок легування чавуну в ковші є оптимальним підходом, що в комплексі з іншими заходами може значно підвищити якість отриманих деталей. Таким чином дослідження показали, що для високонавантажених деталей циліндро-поршневої групи є неминучим перехід на леговані чавуни. Для чавунів для втулок циліндрів дизелів типу ЧН 25/34 це пов'язано з їх переходом на високозернисті палива, а робота нових форсованих двигунів 6ЧН 26/34 без легованих чавунів виявилась неможливою.

**Ключові слова:** двигуни внутрішнього згорання, екологічна безпека, ресурс, поршні, кільця, циліндри, технічний стан, лігатура, чавун.

### IMPROVING THE MECHANICAL PROPERTIES OF THE IRON PARTS OF ICE BY THE METHOD OF COMPLEX DOPING

*L. Klymenko, O. Pryshchepov, O. Shchesiuk, V. Andreev, A. Sluchak*

The article presents the results of long-term studies on the preparation of ligatures for gray and high-strength cast iron, which are used for the casting of key parts of internal combustion engines (ICEs). The main purpose of the study is to extend the life of the components of the ICE by increasing the wear resistance of the main parts (cylinder liners and piston rings). The objectives of the study are to develop a ligature and technology for gray and high-strength pig-iron. The research methods included mathematical modeling by means of regression analysis of Gram matrices formed on the basis of the determined correlation coefficients between the wear resistance of cast iron and its chemical composition, which was checked by Fischer's criterion, as well as practical studies on the casting of pig iron of various brands and bench tests of engines with parts on their basis. The regression equation describing the optimal chemical composition of cast iron is given as  $I = 8.4 + 0.9C - 0.6Si - 3.2Mn - 84.4P - 4.5Ti - 33.8S + 9.3Cr + 0.4Ni - 5.9Cu - 1.1V + 24.3Mo$ . The basis for the development was the analysis of a sufficient number of literary sources related to the dopant properties of different elements when applied in gray and high-strength pig-iron. The main results of the literary search are presented in the corresponding section, where doping with nickel, chromium, molybdenum, vanadium, copper, silicon, titanium and other elements is covered. It was developed and protected by patents of Ukraine No. 25099 and number 25100 highly effective ligatures for pig-iron parts of cylinder-piston group (CPG). The bench tests of hardness resistance of the received pig-iron showed that the formation of sorbitol perlite due to alloying of pig iron in the ladle is an optimal approach that in combination with other measures can significantly improve the quality of the obtained parts. Thus, studies have shown that for super-loaded parts of the cylinder-piston group, the inevitable transition to doped pig-iron is inevitable. For pig-iron for bushings of cylinders of diesel engines of type ЧН 25/34 it is connected with their transition to high-grade fuel, and the work of new forced engines 6CHN 26/34 without doped pig-iron was not possible.

**Key words:** internal combustion engines; environmental safety; resource; pistons; rings; cylinders; technical condition; ligature; cast iron