



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-3-79-85>
УДК 669.13.017: 620.18

Поступила 01.08.2023
Received 01.08.2023

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЫСОКОПРОЧНЫХ ЧУГУНОВ С АУСФЕРРИТНОЙ СТРУКТУРОЙ ДЛЯ СИСТЕМЫ ВОЗВРАТНО-ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ПОРШНЕЙ ДВС И УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЕЕ РАБОТЫ

С. Н. ЯНКЕВИЧ, И. Н. ХРОЛЬ, ОАО «Приборостроительный завод Оптрон»,
г. Минск, Беларусь, ул. Ф.Скорины, 52. E-mail: nio@optron.by

М. С. КОВАЛЬКО, Физико-технический институт НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь, ул. Купревича, 10
И. И. ПОЛИДОВЕЦ, ОАО «Приборостроительный завод Оптрон», г. Минск, Беларусь, ул. Ф. Скорины, 52

В рамках проводимых работ, связанных с совершенствованием конструкции комбинированной системы преобразования возвратно-поступательного перемещения (КСПВПП) поршней и оптимизацией основных параметров ее работы, возникла необходимость выбора материалов. Изготовление направляющей и ролика КСПВПП подразумевает использование специальных составов чугунов. Причем для производства направляющей требуется использование высокопрочных чугунов с шаровидной формой графита (ВЧШГ). Проведены исследования трех составов образцов высокопрочных чугунов после изотермической закалки, применение которых планируется использовать при изготовлении ДВС с усовершенствованной конструкцией комбинированной системы преобразования возвратно-поступательного перемещения. Оптимальным сочетанием прочностных и пластических свойств обладают образцы из высокопрочных чугунов, содержащих 2,9–3,1 мас. % С; 3,2–3,5 мас. % Si; 0,28–0,31 мас. % Mn; 0,7 мас. % Cu; 0,35 мас. % Mo и 0,025 мас. % В, подвергнутых изотермической выдержке при 350 в течение 20 мин. Рассмотрено влияние различных способов охлаждения при проведении изотермической закалки чугунов: в спрейерной камере и струйным охлаждением как альтернативе традиционной закалке в расплаве солей. Полученные данные указывают, что при струйно-воздушной изотермической закалке происходит полное и равномерное формирование структуры чугуна по сечению, обеспечивая при этом уровень предела прочности при растяжении до 950 МПа, твердости до 360–370 НВ с сохранением относительного удлинения при растяжении до 8%. Использование такого класса чугунов в усовершенствованных КСПВПП позволит как увеличить ресурс работы ДВС в целом, так и улучшить его эксплуатационные характеристики – снизить шум и уменьшить массу конструкции.

Ключевые слова. ДВС, возвратно-поступательное перемещение, поршни двигателя внутреннего сгорания, высокопрочный чугун, изотермическая закалка, аусферрит.

Для цитирования. Янкевич, С. Н. Использование высокопрочных чугунов с аусферритной структурой для системы возвратно-поступательного перемещения поршней ДВС и усовершенствование параметров ее работы / С. Н. Янкевич, И. Н. Хроль, М. С. Ковалько, И. И. Полидовец // *Литье и металлургия*. 2023. № 3. С. 79–85. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-3-79-85>.

THE USE OF HIGH-STRENGTH CAST IRON WITH A FERRITIC STRUCTURE FOR THE RECIPROCATING DISPLACEMENT SYSTEM OF THE INTERNAL COMBUSTION ENGINE PISTONS AND THE IMPROVEMENT OF ITS OPERATION PARAMETERS

S. N. YANKEVICH, I. N. KHROL, OJSC “Instrument-Making Plant Optron”,
Minsk, Belarus, 52, F. Scoriny str. E-mail: nio@optron.by

M. S. KOVAL'KO, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus,
Minsk, Belarus, 10, Academician Kuprevich str.

I. I. PALIDAVETS, OJSC “Instrument-Making Plant Optron”, Minsk, Belarus, 52, F. Scoriny str.

A study of compositions of samples of high-strength cast iron, the use of which is possible in the development of an internal combustion engine with an improved design of a combined reciprocating conversion system, has been carried out. A number of research methods were carried out, including isothermal hardening. The optimal combination of strength and plastic properties have samples from high-strength cast iron containing, wt. %: 2.9–3.1 C; 3.2–3.5 Si; 0.28–0.31 Mn; 0.7 Cu; 0.35 % Mo and 0.025 B. Also, in the course of the study, the possibility was considered and studies were conducted on quenching cast iron in a spray

chamber and jet cooling, as an alternative to traditional quenching in molten salts. The data obtained indicate that during jet-air isothermal quenching, the structure of cast iron is completely and uniformly formed along the cross-section, while providing a level of tensile strength up to 950 MPa, hardness up to 360–370 HV while maintaining elongation at tension up to 8%. The use of such a class of cast iron in improved KSPVPP will both increase the life of the internal combustion engine as a whole, and improve its operational characteristics – reduce noise and reduce the weight of the structure.

Keywords. internal combustion engine, reciprocating movement, internal combustion engine pistons, ductile iron, austempered, ausferrite

For citation. Yankevich S.N., Khrol I.N., Koval'ko M. S., Palidavets I.I. The use of high-strength cast iron with a ferritic structure for the reciprocating displacement system of the internal combustion engine pistons and the improvement of its operation parameters. *Foundry production and metallurgy*, 2023, no. 3, pp. 79–85. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-3-79-85>.

Развитие современных технологий производства и изготовления двигателей внутреннего сгорания (ДВС) определяют новые проблемы, которые связаны с повышением требований к качеству его компонентов, а также к эксплуатационным характеристикам его деталей (уменьшение массы, объема, вибрации и т.д.). Совершенствование ДВС идет по пути повышения их мощности, надежности и долговечности, уменьшения массы и габаритов, создания новых конструкций [1]. Темпы повышения требований постоянно растут, что заставляет все быстрее решать конструкторские, а также технологические задачи при производстве современных двигателей. Выбранный вариант технологического процесса должен быть оптимален и обеспечить в дальнейшем минимальную трудоемкость и себестоимость при стабильно высоком уровне качества продукции [2].

ДВС на сегодняшний день является самым распространенным двигателем в мире. Традиционная схема подразумевает наличие кривошипно-шатунного механизма [3, 4], кинематика которого использовалась еще ранее при передаче движения от водяного колеса к полотну пилорамы. По прошествию времени схема эволюционировала в современное представление ДВС, но не лишилась основного своего недостатка: шатун, прикрепленный к шейке кривошипа, описывает большую траекторию в плоскости, перпендикулярной оси, проходящей через верхнюю и нижнюю мертвую точку, что вызывает сильное воздействие боковой силы от реактивного момента, прижимающей поршень к стенкам цилиндра. Износ материалов в данной паре трения может достигать 38% от их исходной массы, в связи с чем актуальным является поиск и разработка новых типов используемых материалов для ДВС.

Цель настоящей работы – разработка износостойчивого материала для изготовления значимых деталей ДВС, а также минимизация затрат при достижении установленных требований к детали в зависимости от ее назначения.

Теоретические аспекты изготовления двигателя

Рассматриваемая комбинированная система преобразования возвратно-поступательного перемещения поршней во вращательное (КСПВП) в ДВС состоит из наиболее ответственных компонентов: направляющей, стойки и ролика (рис. 1).

Повышение мощности, улучшение технических характеристик и ресурса работы ДВС непрерывно связано с совершенствованием конструкции комбинированной системы преобразования возвратно-поступательного перемещения (КСПВП) поршней и оптимизацией основных параметров ее работы, а также с рациональным выбором материалов различных составных компонентов. ДВС состоит из блока цилиндров, подвижного кривошипно-шатунного механизма (КШМ), газораспределительного механизма (ГРМ), а также систем питания, смазки, охлаждения, зажигания, впрыска и выхлопа. Именно подвижные компоненты в процессе работы двигателя испытывают наибольшие нагрузки. В зависимости от условий работы и предъявляемых требований к данным деталям для их производства используются различные материалы. Наиболее часто используемые, а также наиболее дешевые – сталь, чугун, алюминиевые и магниевые сплавы. Например, использование упрочненных чугуновых гильз по технологии CGI (Compacted

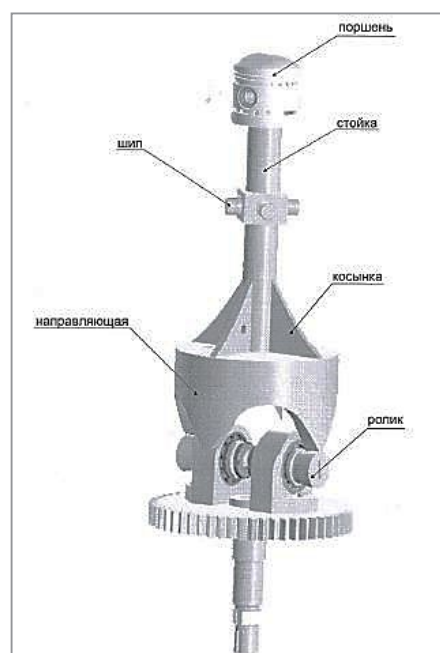


Рис. 1. Основные компоненты КСПВП

Graphite Iron) позволяет реализовать высокую степень форсирования у дизельных двигателей за счет увеличения модуля упругости чугуна на 40%, а прочности при растяжении – на 75% в сравнении с традиционно используемыми серыми чугунами [5].

Применение чугуна как основного материала для производства блока цилиндров, гильз, коленчатых валов и других компонентов ДВС оправдано как его относительно низкой стоимостью, так и рядом технологических преимуществ, среди которых хорошая жидкотекучесть при литье, высокая теплопроводность, меньший удельный вес по сравнению со сталью (на 10%), а также способность быстро гасить вибрации и звук (высокая демпфирующая способность) [6]. К тому же современные чугуны с компактной формой графита (шаровидной, вермикулярной или пластинчатой) обладают высокими показателями прочности на разрыв (500–1200 МПа) и широким диапазоном значений твердости (от 220–250 до 40–60 ед. HRC) [7].

В табл. 1 приведены основные механические свойства чугунов с различной формой графитовых включений, используемых при производстве компонентов ДВС.

Таблица 1. Механические свойства различных типов чугунов (ГОСТ 1412-85, 28394-89, 7293-85)

Тип чугуна	Основные показатели механических свойств		
	предел прочности σ_b , МПа	твердость HB	относительное удлинение при растяжении δ , %
Серый чугун с пластинчатым графитом (ГОСТ 1412)	100–350	180–210	–
Чугун с вермикулярным графитом (ГОСТ 28394)	300–450	130–250	0,8–3,0
Чугун с шаровидным графитом (ГОСТ 7293)	350–1000	140–360	2–15

Из таблицы видно, что уровень прочностных и пластических свойств чугунов со свободной формой углерода растет при увеличении степени сфероидизации графита. Различие свойств в этих случаях объясняется формированием гетерогенной структуры сплава – включения графита (Г) разной формы расположены в металлической матрице различного структурного типа (перлита (П) или феррита (Ф)).

У чугунов с правильной шаровидной формой графита наблюдается наиболее высокий уровень свойств среди железоуглеродистых сплавов данного класса. При этом для ВЧШГ характерен тот факт, что с увеличением прочности с 350 до 800 МПа его пластические свойства снижаются в 5–7 раз (табл. 2).

Таблица 2. Свойства некоторых марок высокопрочных чугунов с шаровидной формой графита (ВЧШГ) [ГОСТ 7293-85]

Марка чугуна	Структура металлической матрицы	Основные показатели механических свойств		
		Предел прочности σ_b , МПа	Твердость HB	Относительное удлинение при растяжении δ , %
ВЧ35	Ф	350	140–170	10–15
ВЧ50	Ф + П	500	150–250	7
ВЧ80	П	800	250–351	2

Проведение дополнительной термической обработки в виде изотермической закалки позволяет не только добиваться повышения прочности в ВЧ до 1200 МПа, но и сохранять пластичность. После изотермической закалки металлическая матрица представляет собой смесь игольчатого феррита ($\Phi_{иг}$) и остаточного аустенита ($A_{ост}$), называемая бескарбидным бейнитом или аусферритом [8]. Добавки Cr и Mo до 0,5% позволяют добиваться большего уровня прочности с сохранением пластичности, а дополнительное легирование Cu, Al или Ni в небольших количествах (до 0,3–0,7%) одновременно повышает ударную вязкость чугуна с аусферритной матрицей [9].

Соответственно для обеспечения удовлетворительных технических показателей работы и более длительного срока службы, направляющей в КСПВП, предлагается использование высокопрочных чугунов с шаровидной формой графита и аусферритной металлической матрицей. Исходным материалом для этих целей может служить чугун марок ВЧ40-60 с шаровидной правильной формой графита (ШГф4-ШГф5) диаметром 20–45 мкм и равномерно распределенным в металлической матрице (согласно ГОСТ 3443-87 шкала 3В).

Изготовление направляющей и ролика КСПВП подразумевает использование специальных составов чугунов. Причем для производства направляющей требуется использование высокопрочных чугунов

с шаровидной формой графита (ВЧШГ), а для получения роликов – серых чугунов (СЧ) с отбеленной рабочей поверхностью. Однако получение этих двух различных структурных классов чугунов возможно при приготовлении «общего» расплава с конкретным содержанием углерода и кремния, а перед его разливкой – за счет проведения операций дополнительного модифицирования и легирования, а также регулирования скорости охлаждения при кристаллизации, возможно получение отливок как из ВЧШГ, так и СЧ с градиентной структурой.

Материалы и оборудование

Для проведения исследования высокопрочных чугунов использовали образцы, химический состав которых приведен в табл. 3.

Таблица 3. Химический состав исследуемых высокопрочных чугунов

Номер образца	Химический состав, %								
	C	Si	Mn	Mg	S	P	Cu	Mo	B
1							-	-	-
2	2,9–3,1	3,2–3,5	0,28–0,31	<0,05	<0,006	<0,02	0,7	0,35	0,025
3							1,17	0,2	0,01

Для металлографических исследований образцы шлифовали на установке «НЕРИС» модели 3881Б, а затем полировали на установке «НЕРИС» модели 3881. В качестве полировальной смеси использовали смесь оксида хрома с водой слабой концентрации.

Для изучения микроструктуры использовали как нетравленные образцы, так и после травления. В качестве травителя использовали 4%-ный раствор HNO_3 в этиловом спирте.

Металлографические исследования проводили на металлографическом комплексе на основе микроскопа МИ-1 (фирмы «Планар»), соединенного в единую систему с фотокамерой и платой видеозахвата с выводением изображения на монитор компьютера (диапазон увеличений 100–1000 крат). Обработку и анализ полученных изображений микроструктур выполняли с использованием программного обеспечения для световой микроскопии Image SP.

При проведении исследования выбирали типовое (характерное) место на шлифе при увеличении 100.

Результаты исследований

Образцы химических составов (табл. 3) подвергали изотермической закалке. Режимы закалки и полученный уровень их механических свойств приведены в табл. 4.

Таблица 4. Режимы изотермической закалки чугунов и полученные свойства

Номер образца	Аустенизация		Изотермическая выдержка		Механические свойства		
	t, °C	τ , мин	t, °C	τ , мин	σ_b , МПа	δ , %	твердость НВ
1	910	40	400	10	840	8	290
			350	20	910	5	330
			250	30	930	3	350
2			400	10	950	7	355
			350	20	980	6	360
			250	30	1000	3	380
3			400	10	970	6	355
			350	20	980	5	370
			250	30	1010	2	395

Анализ механических свойств изотермически закаленных образцов чугуна (табл. 4) показывает, что низкий уровень свойств после изотермической закалки нелегированного высокопрочного чугуна объясняется низкой устойчивостью переохлажденного аустенита, что не обеспечивает получения аусферритных структур в данном чугуне в полном объеме. Можно отметить, что наиболее оптимальным сочетанием прочностных и пластических свойств обладают образцы из высокопрочных чугунов, подвергнутых

изотермической выдержке при 350 °С в течение 20 мин (образец № 2, рис. 2). При более высоких температурах закалки (400 °С) чугуны имеют немного больший процент удлинения, при этом происходит значительное снижение предела прочности и твердости, а при более низких температурах (250 °С) относительное удлинение составляет всего 2–3 %.

Микроструктура чугунного образца № 2 показана на рис. 2.

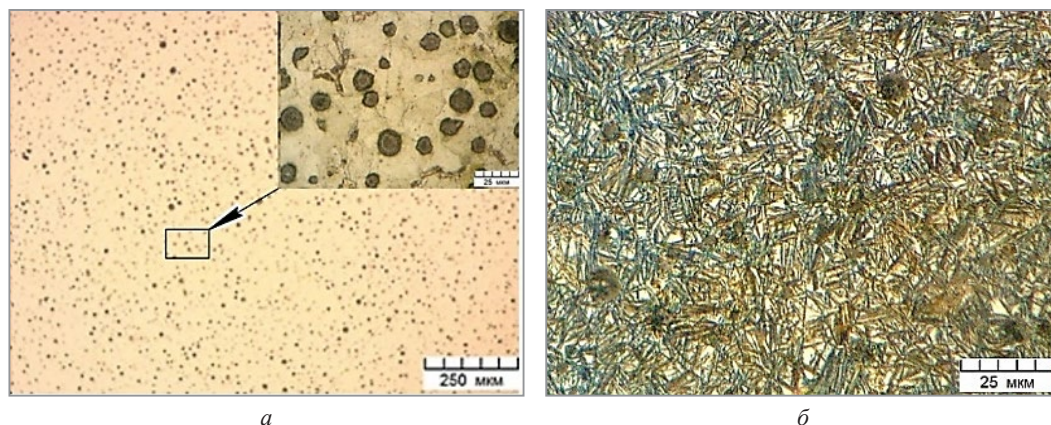


Рис. 2. Микроструктура высокопрочного чугуна до (а) и после (б) изотермической закалки при 350 °С в течение 20 мин: а – нетравленная. $\times 100$; б – травленная. $\times 1000$

Также было проведено исследование возможности закалки чугунов в спрейерной камере и струйным охлаждением. Для исследования был выбран образец чугуна № 2 (табл. 4). Образцы подвергали аустенизации при 910 °С и дальнейшей закалке при охлаждении сжатым воздухом ($p=0,6$ МПа) как в спрейерной камере (рис. 3, а), так и с помощью форсунок (рис. 3, б) до 350 °С. Среднее время охлаждения образцов диаметром 20 мм составляло порядка 10–20 с.

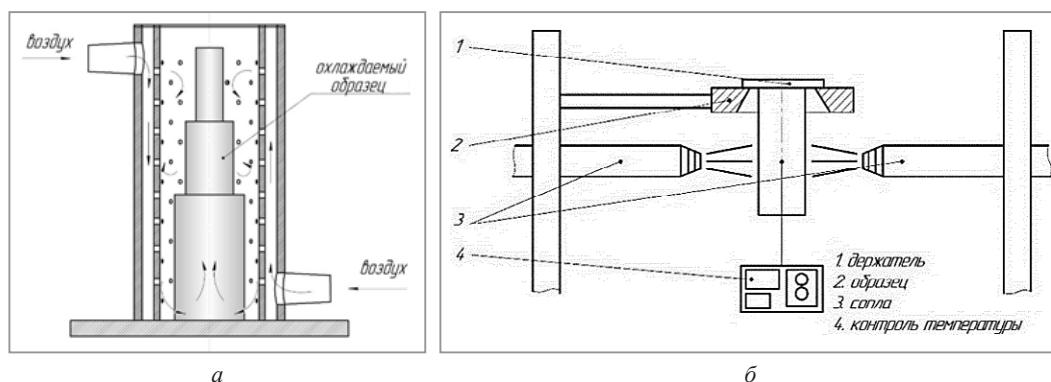


Рис. 3. Схемы закалочного охлаждения: а – охлаждение в спрейерной камере; б – струйное охлаждение

Таблица 5. Механические свойства различно закаленных чугунов с добавками на основе Cu-Mo-B

Способ изотермической закалки	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	δ , %	Твердость НВ
Нагрев 910 °С, охлаждение в спрейере до 350 °С, 20 мин	790	15	330–340
Нагрев 910 °С, струйное охлаждение 350 °С, 20 мин	950	8	360–370

Микроструктуру изотермически закаленных чугунов определяли у края поверхности и в центре образца.

Из результатов металлографического анализа (рис. 4, 5) следует, что интенсивность спрейерного охлаждения значительно ниже, чем при использовании струйного охлаждения. Это подтверждается получаемой структурой и уровнем свойств закаливаемого данным способом чугуна (табл. 5). При использовании струйной закалки охлаждение образца до 350 °С проводится около 10 с, и за данное время в чугуне не успевает произойти перлитный распад аустенита, структура чугуна представляет собой смесь игольчатого феррита и остаточного аустенита, обладая при этом высоким комплексом механических свойств, сопоставимым с чугуном, закаливаемым в расплаве соли.

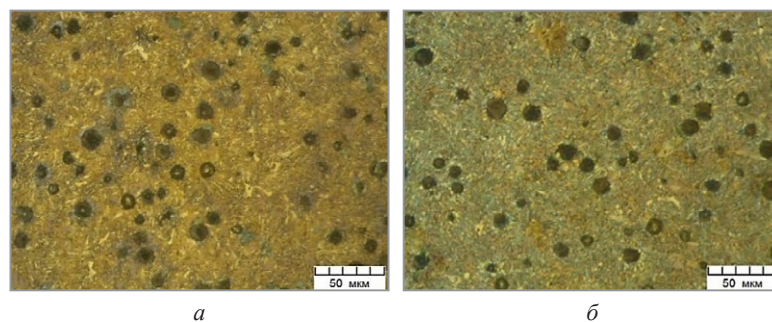


Рис. 4. Микроструктура изотермически закаленного чугуна с помощью спрейерного охлаждения:
a – поверхность; *б* – центр образца. x500

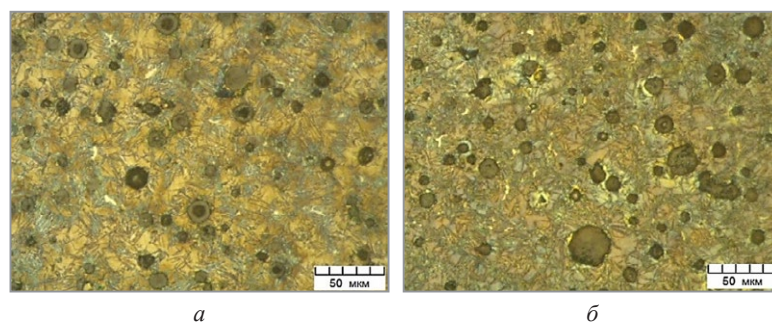


Рис. 5. Микроструктура изотермически закаленного чугуна с помощью струйного охлаждения:
a – поверхность; *б* – центр образца. x500

Выводы

При разработке ДВС с усовершенствованной конструкцией комбинированной системы преобразования возвратно-поступательного перемещения (основные детали – направляющая, стойка и ролик) появилась потребность в использовании материалов, которые обеспечат требуемый ресурс.

Для данных деталей исследовали три состава образцов высокопрочных чугунов, которые подвергли изотермической закалке.

Оптимальным сочетанием прочностных и пластических свойств обладают образцы из высокопрочных чугунов, содержащих 2,9–3,1 мас. % С; 3,2–3,5 мас. % Si; 0,28–0,31 мас. % Mn; 0,7 мас. % Cu; 0,35 мас. % Mo и 0,025 мас. % В, подвергнутых изотермической выдержке при 350 °С в течение 20 мин. При более высоких температурах закалки (400 °С) чугуны такого класса имеют немного больший процент удлинения, при этом происходит значительное снижение предела прочности и твердости, а при более низких температурах (250 °С) относительное удлинение резко снижается и составляет всего 2–3 %.

Проведено исследование возможности закалки чугунов в спрейерной камере и струйным охлаждением как альтернативе традиционной закалке в расплаве солей. Полученные данные указывают, что при струйно-воздушной изотермической закалке происходит полное и равномерное формирование структуры чугуна по сечению, обеспечивая при этом уровень предела прочности при растяжении до 950 МПа, твердости до 360–370 НВ с сохранением относительного удлинения при растяжении до 8 %. Использование такого класса чугунов в усовершенствованных КСПВПП позволит как увеличить ресурс работы ДВС в целом, так и улучшить его эксплуатационные характеристики – снизить шум и уменьшить массу конструкции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Охотников, Б.Л. Эксплуатация двигателей внутреннего сгорания / Б.Л. Охотников. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014. 140 с.
2. Леви, Л.И. Основы теории металлургических процессов и технология плавки литейных сплавов / Л.И. Леви. М.: Машиностроение, 1970. 496 с.
3. Кривошипно-шатунный механизм, назначение, детали и узлы КШМ [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://infourok.ru/krivoshipnoshatunniy-mehanizm-naznachenie-i-detali-i-uzli-kshm-2230073.html>.
4. Кривошипно-шатунный механизм (КШМ). Назначение, устройство, принцип действия [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ustroistvo-avtomobilya.ru/dvigatel/krivoshipno-shatunniy-mehanizm/krivoshipno-shhatunniy-mehanizm>.
5. Обрабатываемые материалы [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.sandvik.coromant.com/ru/knowledge/materials/pages/workpiece-materials.aspx>.

6. **Guesser, Wilson.** Compacted Graphite Iron – a new material for diesel engine cylinder blocks. 2022.
7. **Aribo, S.** Mechanical and microstructure properties of ADI produced by interrupted cooling in warm water, *Annals of faculty engineering Hunedoara // International journal of Engineering*, 2016. Vol. XIV. P. 197–202.
8. **Крутилин, А. Н.** Литые шестерни из высокопрочного чугуна, подвергнутого изотермической закалке / А. Н. Крутилин, А. Т. Скойбеда, Г. В. Стасевич, В. С. Чешун, М. И. Курбатов // *Литье и металлургия*. 2007. № 1. С. 111–114.
9. **Mrzyglód, Barbara & Kowalski, Olejarczyk A. &, Izabela & Adrian, Henryk & Glowacki, Melanie & Opaliński, Andrzej.** Effect Of Heat Treatment Parameters On The Formation Of ADI Microstructure With Additions Of Ni, Cu, Mo // *Archives of Metallurgy and Materials*. 2015.

REFERENCES

1. **Ohotnikov B.L.** *Jekspluatacija dvigatelej vnutrennego sgoranija* [Operation of internal combustion engines]. Ekaterinburg, Izd-vo Ural. un-ta Publ., 2014, 140 p.
2. **Levi L.I.** *Osnovy teorii metallurgicheskikh processov i tehnologija plavki litejnyh splavov* [Fundamentals of the theory of metallurgical processes and the technology of melting casting alloys]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1970, 496 p.
3. <https://infourok.ru/krivoshipnoshatunniy-mehanizm-naznachenie-i-detali-i-uzli-kshm-2230073.html>.
4. <https://ustroistvo-avtomobilya.ru/dvigatel/krivoshipno-shatunnyj-mehanizm/krivoshipno-shhatunnyj-mehanizm>.
5. <https://www.sandvik.coromant.com/ru/knowledge/materials/pages/workpiece-materials.aspx>.
6. **Guesser Wilson.** Compacted Graphite Iron – a new material for diesel engine cylinder blocks, 2022.
7. **Aribo S.** Mechanical and microstructure properties of ADI produced by interrupted cooling in warm water, *Annals of faculty engineering Hunedoara. International journal of Engineering*, 2016, vol. XIV, pp. 197–202.
8. **Krutilin A.N., Skojbeda A.T., Stasevich G.V., Cheshun V.S., Kurbatov M.I.** Litye shesterni iz vysokoprochnogo chuguna, podvergnutogo izotermicheskoj zakalke [Cast gears made of ductile iron, isothermally hardened]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2007, no. 1, pp. 111–114.
9. **Mrzyglód, Barbara & Kowalski, A. & Olejarczyk, Izabela & Adrian, Henryk & Glowacki, Melanie & Opaliński, Andrzej.** Effect Of Heat Treatment Parameters On The Formation Of ADI Microstructure With Additions Of Ni, Cu, Mo. *Archives of Metallurgy and Materials*. 60. 10.1515/amm-2015–0330.