

# ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ДЕТАЛЕЙ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ В УСЛОВИЯХ ТЕРМОУСТАЛОСТНОЙ НАГРУЗКИ

**МЕЖЕЦКИЙ Геннадий Дмитриевич**, Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова

**ЧЕКМАРЕВ Василий Васильевич**, Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова

**НИКИТИН Дмитрий Анатольевич**, Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова

*В работе проведен анализ конструкционного материала – чугуна для дизелей, из которого изготавливаются головки крышки цилиндров. Основным дефектом этих сложных металлоемких деталей являются термоусталостные трещины. Сделан анализ химического состава чугунов различных заводов изготовителей. В результате проведенных исследований определены химические составы чугунов, имеющих наибольшую термоусталостную прочность. Установлено, что для повышения их прочности и долговечности в эксплуатации необходимо изменить процент содержания базовых химических элементов (C, Si, Mn) в чугунах применить редкоземельные металлы (Y, Ce, La). Даны конкретные рекомендации по выбору химического состава чугунов для головок и крышек цилиндров, обеспечивающих увеличение их усталостной прочности и долговечности при эксплуатации. Наилучшее сочетание механической и термоусталостной прочности показали образцы с содержанием углерода C – 4,0 %, кремния Si – 2,0 %, марганца Mn – 0,18 %, иттрия Y – 0,1 %, и меди Cu – 0,8 % при содержании серы S – 0,008 % и фосфора P – 0,1 %.*

**Введение.** Основным дефектом головок и крышек цилиндров дизельных двигателей внутреннего сгорания (ДВС) с непосредственным впрыском топлива являются термоусталостные трещины на привалочной поверхности в зоне межклапанных перемычек. По этой причине выбраковка их при ремонте составляет до 85 %. Появление термоусталостных трещин обусловлено термоциклированием и повышенными градиентами температур, как по поверхности, так и по толщине теплопринимающего (огневого) днища.

При эксплуатации дизеля в поверхностных слоях огневого днища появляются напряжения сжатия, в результате которых в зоне форсуночного отверстия поверхность днища релаксирует. Релаксацией считается самопроизвольное изменение напряжений в материале при неизменном значении величины его общей деформации [5]. Это вызвано переходом упругой деформации в пластическую, в нашем примере – в перемычке между седлами клапанов и форсуночным отверстием. При охлаждении данный участок (рис. 1, см. обложку) будет испытывать напряжения растяжения. Многократная смена напряжений сжатия и растяжения инициирует появление и рост трещин, что в конечном итоге приводит к выбраковке дорогостоящей детали.

В большинстве случаев оценить однозначно сопротивление термической усталости различных материалов чрезвычайно трудно. Однако экспериментальные данные и полученные закономерности сопротивления материалов от циклического деформирования и разрушения позволяют сформулировать общие подходы сравнительной оценки долговечности чугунов с

различным химическим составом. В табл. 1 приведены марки дизельных двигателей, выпускаемых современными фирмами в мире, и указаны химические составы и механические свойства чугунов, применяемых для головок и крышек цилиндров этих двигателей. Однако не в полной мере учтены особенности условий, в которых работают эти детали, а именно высокая температура и термоусталостные режимы эксплуатации. Поэтому целью работы ставилось показать влияние температуры на прочность чугунов с различными химическими элементами и сравнительную их долговечность.

Для решения подобных задач приведем две формулы, по которым рассчитываются напряжения от градиента температур:

$$\sigma = \alpha E (t_2 - t_1), \quad (1)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплового расширения;  $E$  – модуль упругости первого рода, МПа;  $t_1, t_2$  – максимальная и минимальная температура по плоскости огневого днища в процессе эксплуатации дизеля.

Согласно закону Гука [2], напряжения при растяжении (сжатии) определяются по формуле

$$\sigma = E\varepsilon, \quad (2)$$

где  $\varepsilon$  – относительная деформация.

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}, \quad (3)$$

где  $\Delta l$  – абсолютная деформация, мм;  $l$  – длина участка огневого днища или стержня если его вырезать из огневого днища головки цилиндра.



## Химический состав и механические свойства чугунов, применяемых для изготовления

## головок цилиндров дизелей в ведущих странах мира

Марка дизельного двигателя	Химический состав, %											Механические свойства		
	C	Si	Mn	Cr	Cu	Ti	Mo	Ni	P	S	HB	$\sigma_r$ , МПа		
Россия														
ЯМЗ-238НБ	3,2-3,5	2,0-2,5	0,6-0,8	0,3-0,45	0,15-0,4	0,03-0,08	-	0,12	До 0,12	0,025-0,12	187-255	235,2		
ЯМЗ-240, ЯМЗ-241	3,2-3,4	1,8-2,2	0,8-1,0	0,3-0,4	0,03-0,07	-	-	-	До 0,12	До 0,13	180-229	206		
СМД	3,45-3,6	1,7-2,0	0,8-1,0	0,12	0,2	0,03-0,06	-	0,05	До 0,15	До 0,15	190-229	206		
МТЗ	3,2-3,5	1,8-2,5	0,6-0,8	0,3-0,45	0,15-0,4	0,03-0,08	-	До 0,12	До 0,12	0,025-0,12	187-255	235,2		
А-41, А-01М														
США														
Кейс 504 ВДТ	3,39	2,28	0,62	0,28	0,50	-	-	0,2	0,095	0,117	230-270	206		
Джон Дир 640А, 6531А	3,28	1,9	0,66	0,05-0,1	0,32	-	-	0,2	0,081	0,13	212-230	206		
Интернейшнл-Харвестер ДТ-436, ДТ-466	3,36	2,09	0,40	0,45	1,38	0,05	-	0,2	0,07	0,098	297-230	235,4		
Аллис-Чалмерс 3700, 3750, 7030, 7050	3,05	1,83	0,77	0,37	0,66	0,03	0,03	0,2	0,044	0,108	223-230	274,7		
Геркулес-198	3,4	2,12	0,70	0,23	0,15	-	0,04	0,2	0,099	0,187	187-230	235,4		
Англия														
Перкинс 8-150	3,24	2,16	0,71	0,05	0,5	-	-	0,2	0,09	0,205	210-212	206		
Фордзон-Супер Мейджер	3,29	1,97	0,72	0,05	0,13	-	0,07	0,2	0,069	0,097	212	235,4		
Франция														
Рено-591	3,33	1,96	0,96	0,05	0,13	-	-	До 0,2	0,069	0,111	187-229	206		
Италия														
Самда 954	3,17	1,99	0,07	0,05	0,64	0,03	-	До 0,02	0,064	0,092	229-250	206		

Так как задача статически неопределимая [9], для ее решения приравняем правые части уравнений (1) и (2):

$$E \frac{\Delta l}{l} = \alpha l (t_2 - t_1). \quad (4)$$

Из этого уравнения определяем абсолютную деформацию:

$$\Delta l = \alpha l (t_2 - t_1). \quad (5)$$

Учитывая, что  $(t_2 - t_1) = \Delta t$ , уравнение (5) можно записать в следующем виде:

$$\Delta l = \alpha l \Delta t. \quad (6)$$

Анализ формулы (6) показывает, что накопление абсолютной деформации зависит от градиента температур  $\Delta t$  на поверхности огневого днища, длины участка огневого днища, на котором определяется деформация и коэффициента линейного расширения чугуна  $\alpha$ .

Для расчета количества термоциклов до появления трещин (долговечности) использовалось уравнение Мэнсона-Коффина [8, 10]:

$$N^{m_{\text{во}}} = \frac{C_{\text{во}}}{\Delta l} = \frac{C_{\text{во}}}{\alpha \Delta l}, \quad (7)$$

где  $N^{m_{\text{во}}}$  – число термоциклов до разрушения;  $C_{\text{во}}$  – величина предельной термоциклической деформации зарегистрированной до образования трещин;  $\Delta l$  – пластическая деформация за один знакопеременный цикл.

Л.Ф. Коффин в своей работе [10] показал, что если принять степенной коэффициент  $m_{\text{во}} = 1/2$ , то постоянную «С» можно определить как половину истинной пластичности при простом растяжении.

$$C = \frac{1}{\sqrt{2}} \ln \frac{1}{1-\psi}, \quad (8)$$

где  $\psi$  – относительное сужение в шейке образца.

В этом случае принимают, что разрушение наступает, когда произведение  $\Delta l N^{m_{\text{во}}}$  достигает величины С. Это выражение неоднократно изменялось:

по Д. Мартину [6]:

$$C = \frac{1}{2} \ln \frac{1}{1-\psi}, \quad (9)$$

по С. Мэнсону [8]:

$$C = \left( \ln \frac{1}{1-\psi} \right)^{0,6}.$$

Однако при этом сохранялась основная идея зависимости накопленной пластической деформации  $\Delta l N^{m_{\text{во}}}$  от исходной пластической деформации.

**Методика исследований.** Коэффициент С определяли в лабораторных условиях для каждого конструкционного материала в отдельности.

Из выражений (7, 8) видно, что резерв повышения долговечности заложен в свойствах конструкционного материала, который в первую очередь зависит от его химического состава. Для исследования влияния химических элементов на термоусталостную прочность чугунов была отработана методика, позволяющая задавать любой режим нагрева образцов на сконструированной установке. Нагрев производился в индукторе высокочастотного генератора ВЧ 10/044 [3, 7]. Конструкция индуктора, в котором производился нагрев образцов, позволяла исследовать одновременно по три образца. Горячий спай термопары зажимался между образцами. Количество термоциклов контролировали электронным счетчиком. Появление трещин на образцах и их величину определяли с помощью микроскопа МБС-2, структуру металла исследовали на микроскопе МИМ-7. Механические свойства чугунов, твердость НВ и прочность  $\sigma_b$  определялись согласно ГОСТ 24853-81 и ГОСТ 24846-81. Чугуны заданного химического состава выплавляли в индукционной печи емкостью 0,5 т.

**Результаты исследований.** В зависимости от химического состава чугуны классифицируют на простые, содержащие углерод – С, кремний – Si, марганец – Mn, серу – S, фосфор – P, и легированные, содержащие более высокие концентрации этих или других химических элементов. К этим элементам относятся никель – Ni, хром – Cr, молибден – Mo, вольфрам – W, медь – Cu, алюминий – Al, титан – Ti и др. Химические элементы углерод – С, кремний – Si, марганец – Mn, сера – S и фосфор – P являются основой чугуна. От их содержания зависят физико-механические свойства чугуна и термоусталостная прочность. С повышением кремния – Si от 2 до 4 % структура чугуна становится ферритной, твердость НВ112, усталостная прочность  $N^{m_{\text{во}}}$  повышается с 50 до 120 термоциклов.

При увеличении содержания кремния свыше 4 % повышается твердость структуры чугуна, но при этом термоусталостная прочность снижается до  $N^{m_{\text{во}}} = 110$  термоциклов.

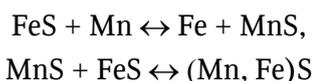
В чугунах, в которых повышается содержание углерода до 4 %, а кремния снижается до 2 %, структура становится ферритно-перлитной. Повышается их твердость до НВ-130, а термоусталостная прочность  $N^{m_{\text{во}}}$  до 130 циклов.

Анализируя данные результаты, можно заключить, что лучшие показатели у чугуна с химическим составом, содержащим С = 3,8–4,0 %, Si = 1,8–2,1 %. Этот чугун имеет меньший коэффициент теплового расширения и выше теплопроводность. Указанное содержание кремния установлено исходя из требования исключить отбел и легирование феррита в чугуне.

Влияние марганца на термоусталостную прочность чугуна следует рассматривать совместно с серой.



Эти два химических элемента в чугуне образуют прочные тугоплавкие малорастворимые сульфиды марганца:



которые располагаются по границам зерен, снижая при этом термоусталостную прочность чугуна.

Известно, что марганец и сера препятствуют графитизации в период кристаллизации чугуна. Поэтому представляет интерес то соотношение между этими элементами, которое обеспечит максимальную графитизацию и термоусталостную прочность. Вместе с этим, влияние Mn и S на свойства чугуна и его термоусталость определяются избытком этих элементов, который остается свободным после образования сульфидов по приведенным выше реакциям. Наиболее полная нейтрализация одного элемента другим наблюдается при соотношении [4]:

$$\text{Mn} = 1,7\text{S} + (0,2...0,3).$$

В большинстве случаев имеет место избыток марганца. Свободный Mn образует непрерывный твердый раствор в закиси железа и окисляет границы зерен, снижая при этом термоусталостную прочность чугуна. По результатам исследования можно заключить, что содержание Mn в чугуне должно быть не выше 0,20–0,25 %. Выше этого предела резко снижается термоусталостная прочность чугуна, которая для головок и крышек цилиндров является одним из основных показателей их долговечности.

Оптимальный химический состав основных элементов (C, Si, Mn) составляет: C = 3,8–4,0 %; Si = 1,8–2,1 %; Mn = 0,2–0,25 % (при S = 0,018–0,02 %; P = 0,1–0,2 %). Термоусталостная прочность чугуна с таким составом  $N^{m_{\text{во}}} = 315$  термоциклов при  $C_{\text{ео}} = 0,085$  и коэффициенте интенсивности роста трещин  $k = 0,02$ .

Сравнение с чугунами головок цилиндров Ярославского и Алтайского моторных заводов было установлено, что  $N^{m_{\text{во}}} = 95$  термоциклов при  $C_{\text{ео}} = 0,02$  и  $k = 0,049$ .

Несмотря на положительные результаты по термоусталостной прочности, у экспериментального чугуна твердость не соответствовала требованиям ГОСТ 3443-87 для головок цилиндров, которому она должна быть HB190...219. В экспериментальном чугуне она составляла HB125.

Исходя из этого, задачей дальнейших исследований ставилось повысить твердость чугуна, не снижая его термостойкости.

Химические элементы, добавляемые в чугун, были разбиты на три подгруппы.

К первой группе относятся металлы, которые с углеродом имеют слабую связь и концентрируются в феррите чугуна: никель – Ni, кобальт – Co, медь – Cu.

Ко второй группе химических элементов можно отнести хром – Cr, молибден – Mo, вольфрам – W и ванадий – V, которые в противоположность

первой группы сужают область  $\gamma$ -раствора. В чугуне они распределяются между аустенитом (ферритом) и цементитом, концентрируясь преимущественно в цементите. Все эти элементы уменьшают активность углерода.

К третьей группе химических элементов отнесены титан – Ti, кальций – Ca, иттрий – Y, магний – Mg, цирконий – Zr, бор – B, церий – Ce, лантан – La. Эти элементы обладают высокой химической активностью и расходуются при плавке на образование специальных карбидов, сульфидов, оксидов нитридов и только в небольшом количестве образуют растворы. В жидком металле они служат зародышами в процессе кристаллизации металла.

Имеются также химические элементы промежуточного типа. Их можно отнести к 4-й группе. К ним относятся металлы алюминий – Al и олово – Sn. Наиболее активным из них является алюминий, отличающийся признаками всех трех групп.

При малых концентрациях алюминий ведет себя как элемент третьей группы, интенсивно реагируя с кислородом, серой азотом и фосфором в чугуне. При более высоких концентрациях избыточный алюминий образует растворы с ферритом или соединения с углеродом, подобно элементам первой группы.

Первая группа элементов (Ni, Co, Cu) и алюминий являются графитизирующими элементами. При этом графитизирующее действие происходит в процессе кристаллизации.

Для определения влияния каждой группы элементов на термоусталостную и механическую прочность мы выбирали по одному химическому элементу из первой и второй группы, по два химических элемента из третьей и промежуточной (четвертой) группы.

В итоге были отобраны из первой группы – медь, из второй группы – хром, из третьей группы – иттрий и церий, из четвертой (промежуточной) группы – алюминий и олово.

На рис. 2 (см. обложку) представлены зависимости термоусталостной прочности чугунов от температуры исследования (1–7 – номера чугунов, представленные в табл. 2).

**Заключение.** В результате исследований чугунов с различным химическим составом, из которых изготавливаются головки и крышки цилиндров дизелей, работающие при высоких температурах и знакопеременной нагрузке, было установлено, что эти детали имеют низкую термоусталостную прочность. Максимальная термоусталостная прочность при исследовании в лабораторных условиях не превышает 90–100 термоциклов.

Для повышения их прочности и долговечности в эксплуатации необходимо изменить процент содержания базовых химических элементов (C, Si, Mn) в чугунах применить редкоземельные металлы (Y, Ce, La). Эти металлы при вводе в жидкий чугун очищают его от окислов, сульфидов, нитри-



Химический состав исследуемых чугунов

№ п/п	C	Si	Mn	S/P	Cr	Ti	Ni	Y	Sn	РЗМ	Cu	Mo	Al	HB	Neo
1	Серийный чугун головок цилиндров дизелей ЯМЗ-238НБ, ЯМЗ-240Б, А-41														
	3,2-3,4	2,0-2,5	0,6-0,8	0,025/0,12	0,3-0,45	0,03-0,08	0,12	-	-	-	0,15-0,4	-	-	187/255	90
2	3,8-4,0	1,8-2,2	0,2-0,25	0,008/0,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	125	315
3*	3,8	0,15	0,15	0,008/0,1	-	-	-	0,13	0,08	-	-	-	-	220	310
4*	3,9	2,0	0,15	0,008/0,1	-	-	-	0,15	-	-	-	-	-	190	345
5*	4,0	2,0	0,18	0,008/0,1	-	-	-	0,1	-	-	0,8	-	-	220	450
6	3,8	2,2	0,2	0,008/0,1	-	-	-	0,1	-	-	-	-	2,5	219	300
7*	3,9	1,9	0,2	0,008/0,1	-	-	-	0,02	-	0,25	-	-	-	190	340

\* Чугуны на основе авторских свидетельств [1, 2].

дов, меняют форму графита с пластинчатой на шаровидную, увеличивают пластичность, твердость и прочность чугуна, как при нормальной температуре, так и при повышенной. Прочность, вместе с этим и долговечность, увеличивается в 3-5 раз по сравнению с чугунами, приведенными в табл. 1.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авторское свидетельство № 994575 СССР, МКИ<sup>3</sup> С22С 37/10 Чугун / Межецкий Г.Д., Аникин А.А.; заявитель Саратовский ордена «Знак Почета» институт механизации сельского хозяйства имени Н.И. Калинина (СССР). – 2 с.: ил.
2. Авторское свидетельство № 1586252 СССР, МКИ<sup>3</sup> С22С 37/10 Чугун / Межецкий Г.Д., Аникин А.А.; заявитель Саратовский ордена «Знак Почета» институт механизации сельского хозяйства имени Н.И. Калинина (СССР). – 2 с.: ил.
3. Влияние температуры на термоусталостную прочность деталей ДВС / Г. Д. Межецкий [и др.] // Научное обозрение. – 2015. – № 8. – С. 121–125.
4. Гиршович Н. Г. Кристаллизация и свойства чугуна в отливках. – М.: Машиностроение, 1996. – 552 с.
5. Золоторевский В.С. Механические свойства металлов. – М.: Металлургия, 1983. – 350 с.
6. Мартин Д. Энергетический критерий при малоцикловой усталости // Техническая механика. – 1980. – № 8. – С. 165–171.

7. Межецкий Г. Д. Методика исследования термостойкости // Вестник машиностроения. – 1980. – № 8. – С. 38–39.

8. Мэнсон С. Температурные напряжения и малоцикловая усталость. – М.: Машиностроение, 1974. – 344 с.

9. Сопротивление материалов: учебник / Г.Д. Межецкий [и др.]. – М., 2007. – 416 с.

10. Coffin L. F. Jr. A Study of the Effects of Cyclic Thermal Stresses on a Ductile Metal. – Transactions of the ASME, Vol. 76, 1954, p. 931–950.

**Межецкий Геннадий Дмитриевич**, д-р техн. наук, проф., Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова. Россия.

**Чекмарев Василий Васильевич**, д-р техн. наук, доцент кафедры «Техническое обеспечение АПК», Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова. Россия.

**Никитин Дмитрий Анатольевич**, д-р техн. наук, доцент кафедры «Техническое обеспечение АПК», Саратовский государственный аграрный университет имени Н. И. Вавилова. Россия.

410056, г. Саратов, ул. Советская, 60.

Тел.: (8452) 74-96-63.

**Ключевые слова:** головка цилиндров; чугун; химический состав; термоусталостная прочность; долговечность.

#### THE DURABILITY OF PARTS OF INTERNAL COMBUSTION ENGINES UNDER THERMAL STRESS LOADING

**Mezhetsky Gennady Dmitrievich**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Saratov State Agrarian University in honor of N.I. Vavilov. Russia.

**Chekmarev Vasily Vasilyevich**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of the chair "Technical Support of the Agricultural and Industrial Complex", Saratov State Agrarian University in honor of N.I. Vavilov. Russia.

**Nikitin Dmitriy Anatolyevich**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of the chair "Technical Support of the Agricultural and Industrial Complex", Saratov State Agrarian University in honor of N.I. Vavilov. Russia.

**Keywords:** cylinder head; cast iron; chemical composition; heat-resistant strength; durability.

**The paper analyzes the structural material-cast iron for diesel engines, from which the cylinder head covers are made.**

**The main defect of these complex metal-intensive parts are heat-resistant cracks. The analysis of chemical composition of cast irons of various manufacturers is made. As a result of the conducted researches chemical compositions of the pig-irons having the greatest heat-fatigue durability are defined. It is established that to increase their strength and durability in operation, it is necessary to change the percentage of basic chemical elements (C, Si, Mn) in cast iron to use rare earth metals (Y, Ce, La). Specific recommendations are given on the choice of the chemical composition of cast iron for cylinder heads and covers, providing an increase in their fatigue strength and durability during operation. The best combination of mechanical and thermal fatigue strength was shown by samples containing carbon C-4.0%, silicon Si-2.0%, manganese Mn-0.18%, yttrium Y-0.1%, and copper Cu-0.8% with sulfur s – 0.008% and phosphorus P – 0.1%.**

