

проката № 20 - 28 из непрерывнолитых заготовок в условиях ПАО «ЕМЗ». Установлено, что требуемый комплекс механических свойств проката достигается при его вылеживании в течение 10-20 дней после прокатки. Необходимо продолжить исследования в направлении повышения уровня пластических свойств проката для анкерной системы крепления горных выработок.

### Библиографический список

1. Термическое упрочнение шахтной крепи / И.Е. Долженков, В.Д. Верболов, Л.В. Пучикова // Термическая обработка металлов. – 1975. – № 4. – С. 15-17.
2. Опорно-анкерное крепление горных выработок угольных шахт / А.Ф. Булат, В.В. Виноградов. – Днепропетровск: ИГТМ НАНУ, 2002. – 372 с.
3. Термоупрочненный периодический прокат для анкерной крепи горных выработок / Г.В. Левченко, А.В. Кекух, В.А. Поляков и др. // Металлург. и горноруд. пром-сть. – 2003. – № 5. – С. 58-61.
4. Освоение производства арматурного проката

для анкерного крепления горных выработок / В.А. Шеремет, А.В. Кекух, Г.В. Левченко и др. // Сталь. – 2004. – № 6. – С. 61-63.

5. Прогнозирование и стабилизация структуры и свойств термоупрочненной арматурной стали / Г.В. Левченко, С.А. Воробей, А.В. Ноговицын, И.А. Гунькин // **Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии**: Сб. научн. тр. Вып. 7. – Днепропетровск: Візіон, 2004. – С. 138-144.

6. Применение математических моделей для прогнозирования микроструктуры термоупрочненного арматурного проката / Г.В. Левченко, С.А. Воробей, Т.В. Грицай и др. // Металлург. и горноруд. пром-сть. – 2006. – № 4. – С. 82-85.

7. Водород в промышленных сталях / В.И. Заика, Ю.А. Кашенко, Г.П. Брехаря. – Запорожье: Запорожский ГУ. – 1998. – 192 с.

8. Термомеханическая обработка проката из непрерывнолитой заготовки малого сечения / В.В. Парусов, А.К. Белитченко, Н.А. Богданов и др. – Запорожье: Запорожский ГУ. – 2000. – 142 с.

**Поступила 23.11.2012**



УДК 620.172.251.1

**Большаков Вл.И. /д.т.н./, Носенко О.П. /к.т.н./, Фёдорова И.С. /к.т.н./**  
ГВУЗ «ПГАСА»

*Наука*

**Зацарная А.В. /к.ф.-м.н./, Шиян А.В. /к.ф.-м.н./**  
Центр «Исследование механических свойств»  
ИМФ им. Г.В. Курдюмова НАНУ  
**Мурашкин А.В. /к.т.н./**  
ПАО «ММК им. Ильича»

## Альтернативная методика определения качества конструкционных сталей

*В данной статье рассмотрена проблема количественной оценки качества сталей по их способности сопротивляться хрупкому разрушению. Исследования по апробации данной альтернативной методики показали, что результаты, полученные при ее использовании, коррелируют с результатами сдаточных испытаний. Было предложено использовать характеристики механической стабильности  $K_{ms}$  и меры оптимальности по механической стабильности  $M_{Kms}^{\sigma}$ , которые могут быть определены путем проведения испытаний на одноосное растяжение, для оценки качества сталей, применяемых в строительных металлоконструкциях и трубах большого диаметра для магистральных нефте-газопроводов. Ил. 3. Табл. 4. Библиогр.: 3 назв.*

**Ключевые слова:** качество стали, хрупкое разрушение, механическая стабильность, одноосное растяжение

*In this article the problem of quantitative estimation of the steel quality according to their ability to resist brittle fracture is considered. The research on the approbation of the alternative method showed that the results obtained using this method correlate with the results of an acceptance tests. It was offered to use the characteristics of the mechanical stability  $K_{ms}$  and measures of optimality for mechanical stability, which can be determined by means of uniaxial tensile tests, to evaluate the quality of steel used in the construction metal structures and large-diameter pipes for main oil and gas pipelines.*

**Keywords:** Isteel quality, brittle fracture, mechanical stability, uniaxial tension

В комплекс механических характеристик, определяющих пригодность металлопроката для применения в строительных металлоконструкциях, входят следующие базовые показатели, которые определяют

при одноосном растяжении цилиндрических или плоских образцов:  $\sigma_{0,2}$  – условный предел текучести, МПа;  $\sigma_B$  – временное сопротивление разрыву (предел прочности), МПа;  $\delta_5$  – относительное удлинение

© **Большаков Вл.И., Носенко О.П., Фёдорова И.С., Зацарная А.В., Шиян А.В., Мурашкин А.В., 2013 г.**

после разрыва, %, определяемое при испытаниях пятикратных цилиндрических образцов ( $l_0 = 5,65\sqrt{F_0}$ );  $\Psi_K$  – относительное сужение поперечного сечения после разрыва, %.

Для оценки вязкости сталей, применяемых в строительных металлоконструкциях, используют такие показатели, как работа разрушения (ударная вязкость) KCU либо KCV, определяемые при испытаниях образцов размером 10x10x55 мм с надрезом на маятниковом копре. Для оценки вязкой составляющей в изломах конструкционной стали выполняют испытание падающим грузом (ИПГ).

В том случае, когда полученные величины механических свойств металла соответствуют стандарту, считают, что металлопрокат пригоден для применения в строительных металлоконструкциях. Если же полученные характеристики не соответствуют значениям, приведенным в стандартах на поставку металлопродукции, считают, что металлопрокат непригоден для применения в данных конструкциях. Такой металлопрокат (продукция) – брак. Эти показатели отражают свойства металла только при условиях проведения испытания и не позволяют прогнозировать возможности работы стали в условиях конструкции. Такие стандартные показатели, как пластичность  $\Psi_K$  или ударная вязкость KCV, далеко не всегда служат надёжной гарантией от возможности хрупкого разрушения конструкции. Причина в том, что в существующей методологии оценки качества сталей и сплавов определяются не прямые механические характеристики, отражающие способность металла сопротивляться переходу в хрупкое состояние, а косвенные, определяющие величины остаточной пластической деформации  $\Psi_K$  или работы разрушения (KCV, KCU) образцов данной геометрии и в заданных условиях лабораторных испытаний. В условиях сложного напряженно-деформированного состояния показатель  $\Psi_K$  теряет свою информативность, а такой интегральный метод оценки вязкости стали, как ИПГ имеет достаточно субъективный характер.

С целью устранения недостатков существующих методик оценки склонности конструкционных сталей к хрупкому разрушению, в Институте металлофизики им. Г.В. Курдюмова НАНУ (ИМФ) совместно с ГВУЗ «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры» (ГВУЗ «ПГАСА») разработана и предложена новая альтернативная методика оценки качества металла по указанному критерию.

В предложенной методике оценки качества конструкционных сталей понятие «качество металла» интерпретируют как уровень (степень) сопротивляемости металла переходу в хрупкое состояние или его удаленность от состояния хрупкости.

В основе предлагаемой методики лежит определение новых базовых характеристик металла: хрупкой прочности ( $R_{MC}$ ) и механической стабильности ( $K_{ms}$ ) [1], а также «индикатора» качества металла – меры оптимальности по механической стабильности ( $\mu_{Kms}^\sigma$ ) при заданной прочности  $\sigma_{0,2}$  [2]. Хрупкая прочность  $R_{MC}$  – это прочность металла при крити-

ческой степени деформации  $\Psi_K = 2\%$  в состоянии перехода из пластического в хрупкое в условиях одноосного растяжения при температуре вязко-хрупкого перехода. Характеристика  $R_{MC}$  прямо зависит от структурного состояния металла и определяется при лабораторных испытаниях цилиндрических образцов на одноосное растяжение [1]. Характеристика механической стабильности  $K_{ms}$  отражает свойство металла сопротивляться переходу в хрупкое состояние или, другими словами, степень его сопротивляемости хрупкому разрушению в условиях одноосного растяжения и, поэтому, может являться **количественной мерой его служебных свойств. Количественно интерпретированной категорией качества** конструкционных сталей («индикатором» их качества) может являться мера оптимальности по механической стабильности  $\mu_{Kms}^\sigma$ , которая представляет собой отношение значения механической стабильности выбранной стали к ее оптимальному (наилучшему) значению при заданном значении прочности  $\sigma_{0,2}$  [2].

**Основные преимущества** предлагаемой методики оценки качества конструкционных сталей с использованием характеристики механической стабильности  $K_{ms}$  следующие:

- связь характеристик хрупкой прочности  $R_{MC}$  и механической стабильности  $K_{ms}$  со структурным состоянием металла;

- использование параметров  $K_{ms}$  и  $\mu_{Kms}^\sigma$ , характеризующих наиболее важное для обеспечения надежности конструкций и механизмов свойство металла – сопротивляемость переходу в хрупкое состояние;

- применимость предлагаемого метода для оценки качества конструкционных сталей и сплавов, широко используемых в различных отраслях промышленности;

- экономическая эффективность при оценке качества металла, обусловленная использованием с этой целью только результатов испытаний стандартных гладких цилиндрических образцов на одноосное статическое растяжение, что доступно для большинства заводских лабораторий;

- инвариантность используемых в методе зависимостей к различным комбинациям прочностных и пластических свойств конструкционных сталей, их видам и режимам термической обработки;

- применимость методики для испытаний металла в температурном диапазоне от 293 до 77 К;

- возможность адаптации к действующим в настоящее время общепринятым методам контроля качества сталей (определение доли вязкой составляющей в изломе образца, ударной вязкости KCV, KCU и др.), а также с целью дополнения и контроля этих методов путем нахождения корреляционных связей между указанными параметрами и предлагаемыми характеристиками при наличии базы данных, содержащей как результаты проведенных испытаний, так и значения базовых механических характеристик соответствующих сталей ( $\sigma_{0,2}$  – условный предел текучести;  $\sigma_B$  – предел прочности;  $\Psi_K$  – относительное

сужение после разрушения образца).

С целью апробации методики экспериментального определения характеристик хрупкой прочности  $R_{MC}$  и механической стабильности  $K_{ms}$  в заводской лаборатории ЛПЦ 3000 на базе ПАО «ММК им. Ильича» (ММК) были проведены испытания цилиндрических образцов из конструкционной стали 10Г2ФБ на растяжение в температурном диапазоне от плюс 20 °С до минус 196 °С.

Испытывали гладкие цилиндрические образцы (рис. 1а) и цилиндрические образцы с кольцевым надрезом (рис. 1б), которые были изготовлены из штрипсовой стали 10Г2ФБ согласно ГОСТ 1497-84 и ГОСТ 22706-77 соответственно.

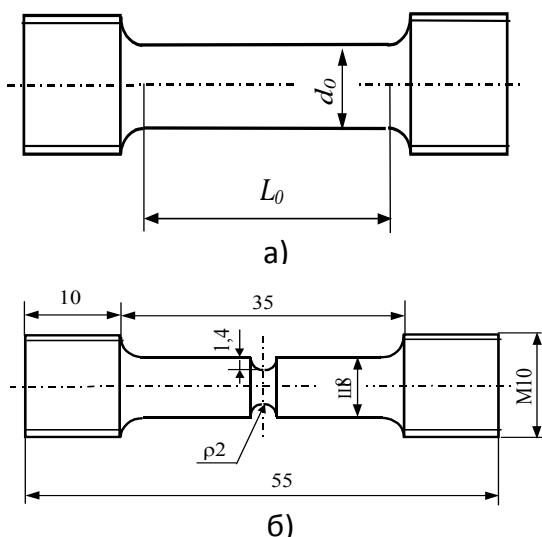


Рис. 1. Схема: а) гладкого цилиндрического образца; б) цилиндрического образца с кольцевым надрезом

Для свариваемых конструкционных сталей, у которых при температуре кипения жидкого азота значения остаточной деформации  $2\% < \Psi_K \leq 20\%$  (сварные швы, термоупрочненный прокат), величину  $R_{MC}$  определяли согласно п. 1.5 и пп. 6.1.1, 6.1.2 методики [3] (далее по тексту – Методика) по результатам испытаний серии из 15-ти гладких цилиндрических

Таблица 1. Химический состав стали 10Г2ФБ плавки № 318099

C	Mn	Si	S	P	Al	Mo	V	Nb	Ti	Cr	Ni	Cu	As	N <sub>2</sub>	Ca	V+Nb+Ti
0,09	1,57	0,25	0,004	0,010	0,040	0,001	0,094	0,035	0,013	0,02	0,01	0,01	0,002	0,007	0,002	0,142

Таблица 2. Механические свойства стали 10Г2ФБ плавки № 318099

$\sigma_T$	$\sigma_B$	$\sigma_T/\sigma_B$	$\delta_5$	ИПП (-20 °С)	KCV (-20 °С)	KCU (-20 °С)	Твердость
МПа	МПа		%	%	Дж/см <sup>2</sup>	Дж/см <sup>2</sup>	HV
520	610	0,85	22,5	100	135	202	163

образцов в температурном интервале  $-196\text{ °С} \leq T_{исп.} \leq +20\text{ °С}$  и, с целью контроля полученного результа-

та, по результатам испытаний серии из 5-ти образцов с кольцевым надрезом. Эти способы определения  $R_{MC}$  были выбраны по причине высоких пластических свойств испытываемой стали ( $\Psi_K > 20\%$  при  $T_{исп.} = -196\text{ °С}$ ), вследствие чего хрупкое разрушение гладких цилиндрических образцов при температуре испытаний  $T_{исп.} = -196\text{ °С}$  (77 К) не происходит.

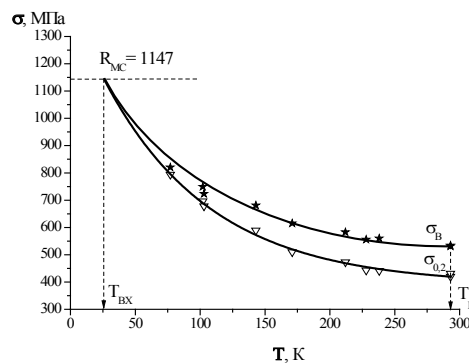


Рис. 2. Определение значения  $R_{MC}$  для серии образцов (ИМФ) в соответствии с пп. 6.1.1 Методики

Химический состав исследуемой стали 10Г2ФБ плавки № 318099 приведен в табл. 1, а механические свойства данной плавки представлены в табл. 2.

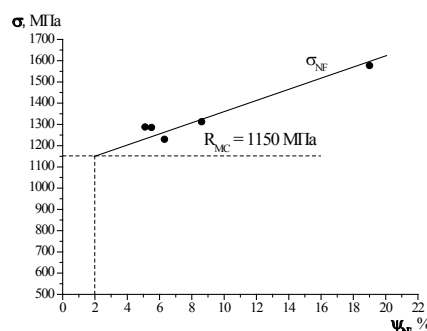


Рис. 3. Определение значения  $R_{MC}$  для серии образцов (ММК) в соответствии с пп. 6.1.2 Методики.

В табл. 3, 4 представлены значения механических характеристик исследуемой стали 10Г2ФБ, а также величины характеристик хрупкой прочности

$R_{MC}$  и механической стабильности  $K_{ms}$ , полученные по результатам испытаний гладких цилиндрических образцов для темпе-

ратурного интервала  $-196\text{ °С} \leq T_{исп.} \leq +20\text{ °С}$  в ИМФ и на ММК.

Из табл. 3, 4 видно, что относительная погрешность при определении величины характеристики хрупкой прочности  $R_{MC}$  стали 10Г2ФБ при испытании двух серий образцов в разных лабораториях и разными способами не превышает  $\pm 1\%$ . Таким образом, предлагаемая Методика применима на практике для

определения характеристик хрупкой прочности  $R_{MC}$ , механической стабильности  $K_{ms}$  и оценки качества конструкционных сталей.

Ниже, в качестве примера, приведена методика определения меры оптимальности (качества)  $\mu_{Kms}^\sigma$  исследованной стали из серии испытаний, проведенных в ИМФ и на ММК (по одному образцу, испытанному при температуре -196 °С из каждой серии).

Значение характеристики механической стабильности  $K_{ms}$  определяется как соотношение значений двух механических характеристик  $\sigma_2$  и  $R_{MC}$ . Его вычисляют по формуле [1]

$$K_{ms} = \frac{R_{MC}}{\sigma_2} = \frac{R_{MC}}{\sigma_{0,2} \cdot 10^n},$$

где  $\sigma_2$  – прочность пластичного металла при критической степени деформации  $\epsilon_c = 2\%$ ;  $R_{MC}$  – хрупкая прочность (прочность при критической температуре вязко-хрупкого перехода  $T_{ex}$ );  $n$  – показатель деформационного упрочнения;  $\sigma_{0,2}$  – условный предел текучести.

Так, для гладкого образца, испытанного при температуре -196 °С в ИМФ:  $\sigma_2 = 838$  МПа,  $R_{MC} = 1147$  МПа. Таким образом,  $K_{ms} = 1,369$ .

Для гладкого образца, испытанного при температуре -196 °С на ММК:  $\sigma_2 = 879$  МПа,  $R_{MC} = 1150$  МПа. Тогда,  $K_{ms} = 1,308$ .

Оптимальное значение механической стабильности  $K_{ms}^{onm}$  при заданной прочности  $\sigma_{0,2}$  рассчитывают по формуле

$$K_{ms}^{onm} = 1 - \frac{a \cdot \psi_K^{onm} + b}{\psi_K^{onm} - c},$$

где  $a = 0,086$ ;  $b = 1,310$ ;  $c = 89,478$ ,

$$\psi_K^{onm} = a - \frac{b}{(1 + c \cdot \sigma_{0,2})^d},$$

где  $a = 84,52$ ;  $b = 1,42$ ;  $c = 0,0001 \left[ \frac{1}{\text{МПа}} \right]$ ;  
 $d = -19,58$

Так, для образца, испытанного в ИМФ:  $\psi_K^{onm} = 78,18\%$ ;  $K_{ms}^{onm} = 1,78$ .

Для образца, испытанного на ММК:  $\psi_K^{onm} = 77,42\%$ ;  $K_{ms}^{onm} = 1,66$ .

Величину меры оптимальности по механической стабильности  $\mu_{Kms}^\sigma$  при заданной прочности  $\sigma_{0,2}$  определяют по формуле

$$\mu_{Kms}^\sigma = \frac{K_{ms}}{K_{ms}^{onm}}$$

Таблица 3. Некоторые результаты серии испытаний, проведенной в ИМФ

Материал	$T_{исп.}$ , К	$\psi_K$ , %	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\psi_p$	$\delta_p$	$S_B$ , МПа	$n$	$\sigma_2$ , МПа	$R_{MC}$ , МПа	$K_{ms}$
10Г2ФБ	77	64,3	794	820	0,033	0,034	848	0,023	838	1147	1,369
	102	67,3	696	749	0,067	0,072	803	0,040	764		1,501
	103	66,5	678	723	0,060	0,064	769	0,037	738		1,554
	212	77,9	473	583	0,141	0,165	679	0,083	573		2,002
	228	75,1	443	556	0,154	0,182	657	0,089	544		2,108
	238	74,3	441	560	0,160	0,191	667	0,093	546		2,101
	293	79,5	420	531	0,151	0,178	625	0,090	517		2,219
	293	79,4	431	534	0,142	0,165	622	0,085	524		2,189

Таблица 4. Некоторые результаты серии испытаний, проведенной на ММК

Материал	$T_{исп.}$ , К	$\psi_K$ , %	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\psi_p$	$\delta_p$	$S_B$ , МПа	$n$	$\sigma_2$ , МПа	$R_{MC}$ , МПа	$K_{ms}$
10Г2ФБ	77	63,1	850	862	0,016	0,016	876	0,015	879	1150	1,308
	112	64,9	710	762	0,065	0,070	815	0,039	777		1,480
	135	72,6	657	705	0,061	0,065	751	0,039	718		1,602
	141	74,4	646	706	0,073	0,079	761	0,045	717		1,604
	161	77,5	556	640	0,105	0,117	715	0,063	642		1,791
	175	73,9	544	647	0,128	0,147	742	0,074	644		1,786
	196	76,4	511	613	0,130	0,149	705	0,076	608		1,891
	293	77,4	422	528	0,150	0,176	621	0,088	517		2,224
	293	78,6	430	527	0,138	0,160	611	0,082	519		2,216

Примечание: значение и способы определения характеристик  $\psi_p$ ,  $\delta_p$ ,  $S_B$ ,  $n$  и  $\sigma_2$  изложены в Методике [3]



Таким образом, для образца, испытанного в ИМФ, имеем

$$\mu_{K_{ms}}^{\sigma} = 0,769,$$

а для образца, испытанного на ММК

$$\mu_{K_{ms}}^{\sigma} = 0,789.$$

Металл имеет высокий уровень качества [2], что соответствует данным, полученным при проведении сдаточных испытаний (доля вязкой составляющей в изломе образца при ИПГ – 100 %)

Способы определения значений  $R_{MC}$  в соответствии с пп. 6.1.1 и 6.1.2 Методики представлены на рис. 2 и 3, соответственно.

### Выводы

1. В ИМФ им. Г.В. Курдюмова НАНУ впервые предложены новые базовые механические характеристики для оценки сопротивляемости конструкционных сталей хрупкому разрушению, которые альтернативны стандартным:  $\psi_k$ , KCV, доли вязкой составляющей в изломах образцов при ИПГ и др.:  $R_{MC}$  – хрупкая прочность (минимальное напряжение хрупкого разрушения металла при значении остаточной деформации ~ 2 %);  $K_{ms}$  – механическая стабильность (свойство металла оказывать сопротивление хрупкому разрушению в условиях одноосного растяжения).

Предложена характеристика для оценки качества – мера оптимальности (качества) металла  $\mu_{K_{ms}}^{\sigma}$  при заданной прочности  $\sigma_{0,2}$ , которая может быть использована в инженерной практике для количественной интерпретации категории «качество» конструкционного металла.

2. ИМФ им. Г.В. Курдюмова НАНУ совместно с ГВУЗ «ПГАСА» разработали методику проведения испытаний на растяжение при температурах от плюс 20 °С до минус 196 °С для экспериментального определения характеристик хрупкой прочности  $R_{MC}$  и механической стабильности  $K_{ms}$  конструкционных сталей (сварных швов).

3. Величина характеристики механической стабильности  $K_{ms}$  штрипсовой стали марки 10Г2ФБ (плавка № 318099) при температуре испытаний +20 °С находилась в пределах 2,189-2,224, при этом значение меры оптимальности  $\mu_{K_{ms}}^{\sigma}$  составляло 0,95-0,99, что свидетельствует о высоком уровне качества испытываемой стали (значение меры оптимальности близко к оптимальному уровню  $\mu_{K_{ms}}^{\sigma} = 1,0$ ).

4. Выполненный комплекс исследований по методике, разработанной ИМФ совместно с ГВУЗ «ПГАСА» показал, что полученные результаты коррелируют с величиной доли вязкой составляющей этой марки стали, полученной по результатам сдаточных испытаний.

5. На основании результатов апробации новой методики для определения комплекса механических свойств конструкционных сталей предлагается:

- для штрипсовых сталей (типа 10Г2ФБ) в документацию на отгрузку дополнительно включать результаты по определению характеристик  $K_{ms}$  и  $\mu_{K_{ms}}^{\sigma}$  на каждую десятую плавку одной кампании выплавки данной марки стали;

- предусмотреть обязательное проведение испытаний по определению  $K_{ms}$  и  $\mu_{K_{ms}}^{\sigma}$  для штрипсовых сталей (типа 10Г2ФБ) при отрицательных результатах ИПГ;

- при удовлетворительных результатах по  $K_{ms}$  и  $\mu_{K_{ms}}^{\sigma}$  металл, в случае неудовлетворительных результатов по ИПГ, может быть отгружен заказчику для использования в более благоприятных климатических условиях;

- предусмотреть обязательное включение данных по  $K_{ms}$  и  $\mu_{K_{ms}}^{\sigma}$  в сдаточную документацию на отгрузку конструкционных сталей, используемых в конструкциях ответственного назначения.

6. Результаты проведенных испытаний могут служить обоснованием для подачи заявки в Министерство регионального строительства и ЖКХ на разработку нормативно-технической документации по определению показателей качества металла.

### Библиографический список

1. С.А. Котречко, Ю.Я. Мешков Предельная прочность. Кристаллы, металлы, конструкции. – К.: Наукова думка, 2008. - 295 с.

2. Мешков Ю.Я., Котречко С.А., Шиян А.В. и др. Новый подход к оценке качества конструкционных сталей // Сталь. - 2012. - № 8. - С. 66-71.

3. Методика проведения испытаний на растяжение при температурах от +20 °С до -196 °С для определения характеристик хрупкой прочности  $R_{MC}$ , механической стабильности  $K_{ms}$  и оценки качества конструкционных сталей.

**Поступила 22.11.2012**