

## Влияние легирования Si или W на прочность и долговечность конструкционной стали X14H20 в условиях теплосмен

А. П. Гопкало

Институт проблем прочности НАН Украины, Киев, Украина

*Представлены результаты экспериментальных исследований влияния легирования конструкционной стали X14H20 в исходном состоянии Si (3%) или W (4%) на характеристики сопротивления кратковременному и длительному статическому и циклическому нагружению в неизотермических условиях. Достаточно четко прослеживается повышение характеристик кратковременной и длительной статической прочности, а также характеристик сопротивления малоциклового неизотермическому нагружению в большей степени при легировании исходной стали вольфрамом и в меньшей степени – кремнием.*

**Ключевые слова:** малоцикловая усталость, длительная прочность, неизотермические условия, формоизменение, истинная пластичность, напряжение, условный предел текучести, долговечность.

### Обозначения

- $\sigma_B$  – предел прочности  
 $\sigma_{0,2}$  – условный предел текучести  
 $\delta$  – относительное удлинение  
 $\psi$  – относительное сужение  
 $\varepsilon_f^{cr}$  – истинная пластичность материала при ползучести  
 $\Phi$  – степень формоизменения образца  
 $\sigma_f^{cr}$  – ограниченный предел длительной прочности  
 $\tau_f^{cr}$  – долговечность материала при испытаниях на длительную прочность  
 $a, b, k$  – коэффициенты  
 $r$  – коэффициент корреляции  
 $m_{1/1}$  – смешанный центральный момент второго порядка  
 $S_x, S_y$  – среднеквадратичные отклонения  
 $\varepsilon$  – истинная пластичность материала при испытаниях на кратковременную статическую прочность и пластичность  
 $\sigma_{min}$  – величина сжимающих напряжений в цикле, действующих при максимальной температуре термоцикла  
 $V_{cr}$  – скорость установившейся ползучести материала  
 $N_f$  – долговечность материала при испытаниях на малоцикловую усталость в неизотермических условиях  
 $2\sigma_a$  – ограниченный предел выносливости (размах напряжений)

**Введение.** Опыт эксплуатации металлургического, горнообогатительного, энергетического и прочего оборудования при воздействии переменных температур и нагрузок показал, что предельное состояние всей конструкции или отдельных ее элементов наступает в результате развития усталостных трещин или существенного изменения исходной геометрии (формоизменения). Изучение условий работы материалов подобного рода свидетельствует о том, что влияние переменных температур и нагрузок вызывает в них циклические напряжения на уровне предела текучести. Столь высокие напряжения обуславливают относительно малое предельное число циклов нагружения: обычно  $10^2 \dots 10^5$  цикл. Эксплуатация конструкций и лабораторные исследования материалов показали, что при малоцикловом нагружении в них могут развиваться повреждения двух видов: квазистатическое и усталостное. При этом предельное состояние материала будет определяться опережающим развитием одного из них, которое, в свою очередь, в общем случае определяется влиянием внешних факторов и свойствами материала. Влияние различных эксплуатационно-технологических факторов на закономерности деформирования и разрушения конструкционных сталей при малоцикловом неизотермическом нагружении исследовано достаточно обстоятельно [1–3]. В то время как исследования влияния изменения химического состава сталей на характеристики сопротивления статическому и циклическому нагружению в неизотермических условиях уделяется недостаточно внимания [4, 5]. Осуществление подобных исследований позволит на основе химического состава материалов предварительно оценивать их сопротивление неизотермическому нагружению и в перспективе перейти к проектированию материалов с заданными свойствами для конкретных условий эксплуатации.

В настоящей работе экспериментально исследовали влияние легирования стали X14H20 в исходном состоянии кремнием (сталь X14H20C3) или вольфрамом (сталь X14H20B4) на характеристики сопротивления кратковременному и длительному статическому и циклическому неизотермическому нагружению. Это связано с поиском возможности использования перспективной стали X14H20 в конструкциях горнообогатительного оборудования путем ее оптимального легирования Si или W.

**Методика исследований.** Кратковременную статическую прочность и пластичность сталей X14H20 (исходная сталь), X14H20C3 и X14H20B4 при комнатной температуре и  $800^\circ\text{C}$  исследовали на испытательной машине УМЭ-10ТМ на сплошных цилиндрических образцах диаметром 6 мм и длиной рабочей части 18 мм. Образцы нагревали в электрической печи сопротивления. В процессе испытаний записывали диаграммы деформирования в координатах нагрузка – удлинение образца, при обработке которых получали характеристики прочности ( $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_B$ ) и пластичности ( $\delta$ ,  $\psi$ ) исследуемых материалов. Химический состав сталей приведен в табл. 1.

Длительную прочность и ползучесть, а также сопротивление исследуемых сталей малоцикловому неизотермическому нагружению определяли на аналогичных образцах. Испытания на длительную прочность и ползу-

чьсть проводили в условиях одноосного растяжения. Нагрев образцов осуществляли методом прямого пропускания электрического тока, охлаждение – естественное, на воздухе. Температуру измеряли хромель-алюмелевой термопарой. Значения истинной пластичности  $\varepsilon_f^{cr}$  определяли по излому путем измерения диаметра образца на инструментальном микроскопе. При пересчете измеренной поперечной деформации образца в продольную использовали зависимость

$$\varepsilon_f^{cr} = \ln \frac{1}{1 - \psi}. \quad (1)$$

Испытания проводили при циклическом изменении температуры по трапецеидальному режиму 200...800°C с выдержкой при максимальной температуре цикла. Длительность цикла составляла 90 с, продолжительность выдержки при максимальной температуре цикла – 40 с, длительность нагрева – ~15 с, охлаждения – ~35 с, скорость нагрева – ~40 град/с, охлаждения – ~15 град/с.

Т а б л и ц а 1

Химический состав (мас.%) исследуемых сталей

Сталь	C	Cr	Ni	Si	W
X14H20	0,05	14,20	19,5	–	–
X14H20C3	0,05	14,64	20,0	3,0	–
X14H20B4	0,14	14,92	19,3	–	4,1

Образцы на малоцикловую усталость в неизотермических условиях испытывали на установке, представляющей собой жесткую раму, внутри которой помещен образец, по описанной методике [2, 6–9].

Предполагалось, что при трапецеидальном температурном цикле развитие получают как процессы накопления усталостных повреждений (в период изменения температуры), так и квазистатических (во время выдержки материала при максимальной температуре термоцикла). Испытания проводили до полного разрушения образца, т.е. до разделения его на две части. Появление макротрещины длиной ~1 мм определяли по моменту резкого падения усилий (по циклическим диаграммам деформирования) и визуально. Результаты испытаний показали, что разрушение происходило по механизму накопления либо усталостных повреждений, либо квазистатических, которые достаточно подробно описаны в работе [3]. Усталостное повреждение характеризуется зарождением и развитием до критических размеров усталостных трещин, квазистатическое – обусловлено процессами ползучести, и разрушение происходит по исчерпанию исходной пластичности материала. При этом разрушению образца предшествует значительное его формоизменение, степень которого оценивали по формуле

$$\Phi = \frac{d_{\max} - d_{\min}}{d_{\text{nom}}} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где  $d_{\max}$ ,  $d_{\min}$ ,  $d_{\text{ном}}$  – соответственно максимальный, минимальный и номинальный диаметры образца (рис. 1). Если  $\Phi < 5\%$ , то такое разрушение считали усталостным, если  $\Phi > 5\%$  – квазистатическим.

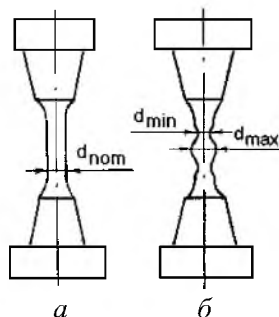


Рис. 1. Форма образцов до (а) и после испытаний (б) на малоцикловую усталость в неизотермических условиях.

**Результаты эксперимента и их обсуждение.** Анализ результатов испытаний исследуемых сталей на кратковременную статическую прочность и пластичность (табл. 2) показал, что легирование исходной стали X14H20 кремнием или вольфрамом повышает предел прочности на 12 и 53%, а условный предел текучести на 15 и 38,5% соответственно. При этом характеристики пластичности также возрастают и в наибольшей степени для стали, легированной кремнием.

Т а б л и ц а 2

Характеристики статической прочности и пластичности исследуемых сталей

Сталь	$T, ^\circ\text{C}$	$\sigma_{\text{в}}, \text{МПа}$	$\sigma_{0,2}, \text{МПа}$	$\delta, \%$	$\psi, \%$
X14H20	800	142,9	127,2	22,5	10,2
X14H20C3	800	161,0	147,2	46,8	44,6
X14H20B4	800	218,6	176,2	38,4	41,6

Исследования влияния легирующих элементов на длительную прочность в неизотермических условиях при нагреве по трапецеидальному режиму  $200...800^\circ\text{C}$  (табл. 3 и рис. 2) свидетельствуют, что легирование исходной стали X14H20 кремнием не оказывает существенного влияния на характеристики сопротивления данному нагружению. В то время как легирование вольфрамом повышает предел длительной прочности в диапазоне долговечностей  $10^2...10^3$  ч в среднем в два раза. Для стали X14H20B4 минимальные скорости установившейся ползучести в исследованном диапазоне варьирования напряжений значительно ниже, чем для стали X14H20C3. Зависимости долговечности от напряжений (рис. 2) могут быть описаны уравнением, значения коэффициентов которого приведены в табл. 3:

$$\lg \tau_f^{cr} = b \lg \sigma_f^{cr} + a. \quad (3)$$

Т а б л и ц а 3

Результаты испытаний исследуемых сталей на длительную прочность при нагреве по трапецидальному режиму 200...800°C

Сталь	$\sigma_f^{cr}$ , МПа	$\tau_f^{cr}$ , ч	$a$	$b$	$r$
X14H20	70,3	9,0	2,840	-0,824	-0,838
	70,3	19,0			
	44,0	170,0			
	35,0	573,0			
X14H20C3	100,0	1,5	3,240	-0,107	-0,752
	70,3	19,0			
	70,3	35,5			
	44,0	64,5			
	44,0	332,0			
	35,0	1155,0			
X14H20B4	100,0	66,0	3,407	-0,510	-0,850
	100,0	143,0			
	70,3	281,0			
	70,3	595,0			
	44,0	959,0			
	44,0	2240,0			

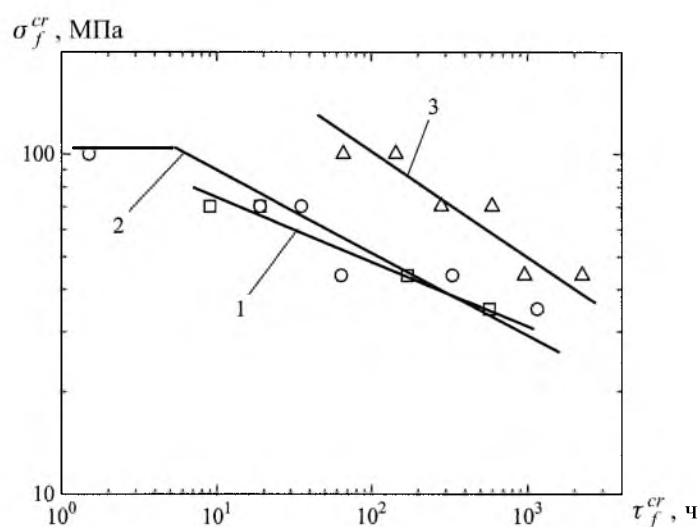


Рис. 2. Кривые длительной прочности сталей при нагреве по трапецидальному режиму 200...800°C. (Здесь и на рис. 2–7: 1 – сталь X14H20; 2 – сталь X14H20C3; 3 – сталь X14H20B4.)

Там же представлены коэффициенты корреляции  $r$ , полученные при статистической обработке экспериментальных данных методом наименьших квадратов. Коэффициенты корреляции определяли по формуле

$$r = \frac{m_{1/1}}{S_x S_y}. \quad (4)$$

Рис. 3 иллюстрирует зависимости истинной пластичности от времени испытаний. Следует отметить, что в диапазоне долговечностей  $10^0 \dots 10^3$  ч сталь X14H20C3 имеет более высокие значения истинной пластичности, чем стали X14H20 и X14H20B4. Для сталей X14H20C3 и X14H20 характерна общая тенденция к снижению указанной характеристики с увеличением времени испытаний во всем исследованном диапазоне долговечностей. При долговечности выше  $10^3$  ч истинная пластичность для стали X14H20B4 резко снижается.

Степень реализации процессами ползучести материала истинной пластичности после испытаний на кратковременную статическую прочность и пластичность при температуре, соответствующей максимальной температуре неизотермического цикла, показана на рис. 4.

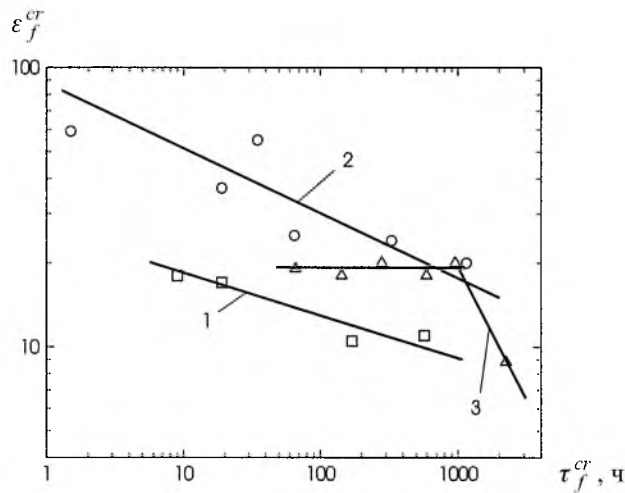


Рис. 3. Зависимость истинной пластичности при разрушении образцов от длительности испытаний при нагреве по трапецидальному режиму 200...800°C.

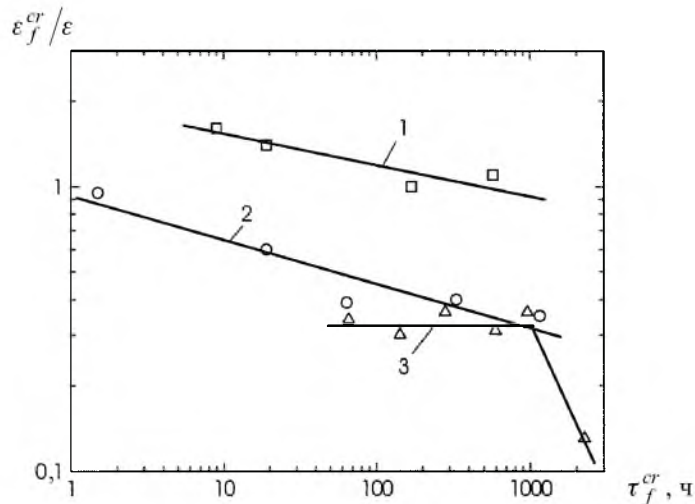


Рис. 4. Зависимость приведенной истинной пластичности при разрушении образцов от длительности испытаний при нагреве по трапецидальному режиму 200...800°C.

По степени реализации исходной истинной пластичности  $\varepsilon$  исследуемые стали условно можно разбить на три группы:  $\varepsilon_f^{cr} > \varepsilon$  – стали, реализованная во времени истинная пластичность которых больше исходной (сталь X14H20);  $\varepsilon_f^{cr} \leq \varepsilon$  – истинная пластичность меньше или равна исходной (сталь X14H20C3);  $\varepsilon_f^{cr} \ll \varepsilon$  – истинная пластичность значительно меньше исходной (сталь X14H20B4).

Сопоставление результатов испытаний сталей на длительную прочность в неизотермических условиях при нагреве по трапецеидальному режиму 200...800°C свидетельствует о явном преимуществе стали X14H20B4.

Как уже отмечалось, квазистатическое разрушение лабораторных образцов или отдельных конструктивных элементов при малоцикловом неизотермическом нагружении характеризуется существенным изменением их исходной геометрии. Ранее [3, 10] проведенные исследования показали, что степень формоизменения образцов зависит от многих факторов внешнего воздействия. Например, таких как минимальная и максимальная температуры цикла, асимметрия действующих напряжений, частота нагружения, форма цикла, скорость нагрева и охлаждения, свойства материала и т.п. Установлено, что влияние этих факторов на формоизменение образцов можно описать двумя основными параметрами: отношением сжимающих напряжений в цикле  $\sigma_{\min}$ , действующих при максимальной температуре цикла, к условному пределу текучести  $\sigma_{0,2}$ , определенному при той же температуре цикла и скорости установившейся ползучести материала.

Ранее [10] для сталей 15XMл и 20XMл показано, что отношение  $\sigma_{\min}/\sigma_{0,2}$  имеет пороговый интервал, превышение которого обуславливает преобладающее развитие в материале процессов ползучести, которые приводят к формоизменению образца. Так, если  $\sigma_{\min}/\sigma_{0,2} \geq 0,6...0,8$ , то преобладающее развитие получает процесс квазистатического повреждения, если же  $\sigma_{\min}/\sigma_{0,2} \leq 0,6...0,8$ , – процесс усталостного повреждения.

На рис. 5 и 6 приведены зависимости соответственно степени формоизменения образцов и циклической долговечности от отношения  $\sigma_{\min}/\sigma_{0,2}$ . Заметим, что при  $\sigma_{\min}/\sigma_{0,2} \geq 0,6...0,75$  происходило квазистатическое разрушение с изменением исходной геометрии образцов, а при значениях  $\sigma_{\min}/\sigma_{0,2} \leq 0,6...0,75$  – усталостное разрушение. Полученные пороговые значения  $\sigma_{\min}/\sigma_{0,2}$  совпадают с аналогичными значениями для ранее исследованных сталей 15XMл и 20XMл [10]. Можно отметить, что легирование исходной стали X14H20 кремнием практически не влияет на величину формоизменения, в то время как добавление вольфрама существенно ее снижает.

Результаты испытаний сталей X14H20, X14H20C3 и X14H20B4 на малоцикловую усталость в неизотермических условиях при нагреве по трапецеидальному режиму 200...800°C (табл. 4, рис. 7) могут быть описаны зависимостью

$$\lg N_f = b + k(2\sigma_a), \quad (5)$$

где значения коэффициентов  $k$  и  $b$  представлены в табл. 4. Там же приведены значения коэффициентов корреляции  $r$ .

Т а б л и ц а 4

Результаты испытаний исследуемых сталей на малоцикловую усталость в неизотермических условиях при нагреве по трапецеидальному режиму 200...800°C

Сталь	$2\sigma_a$ , МПа	$N_f$ , цикл	Вид разрушения	$k$	$b$	$r$
X14H20	488	1475	Квазистатическое	-0,0083	3,584	-0,911
	447	1789	- » -			
	475	1659	- » -			
	390	3025	- » -			
	264	13478	Усталостное			
X14H20C3	454	2136	Квазистатическое	-0,0206	4,150	-0,979
	453	1572	- » -			
	421	2646	- » -			
	330	14752	Усталостное			
X14H20B4	495	3143	Квазистатическое	-0,0136	4,172	-0,899
	428	5616	- » -			
	452	3230	- » -			
	400	15512	Усталостное			

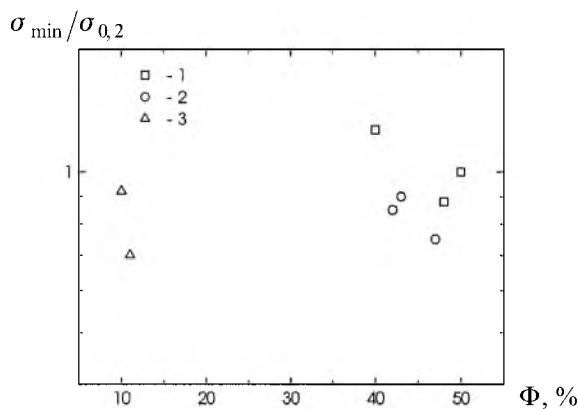


Рис. 5. Зависимость степени деформации образцов от отношения величины минимальных напряжений в цикле к пределу текучести материала при нагреве по трапецеидальному режиму 200...800°C.

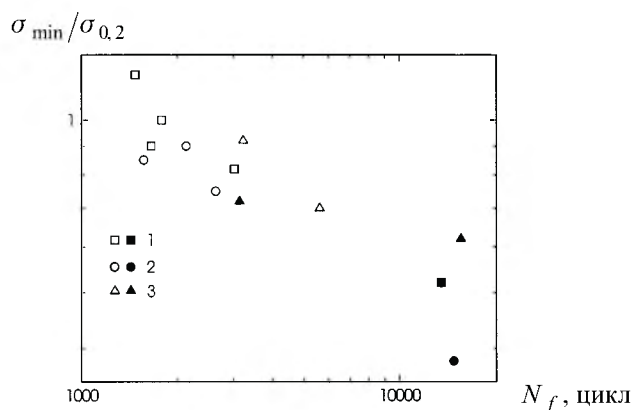


Рис. 6. Зависимость циклической долговечности сталей от отношения величины минимальных напряжений в цикле к пределу текучести материала. (Здесь и на рис. 7: светлые точки – квазистатическое разрушение, темные – усталостное.)



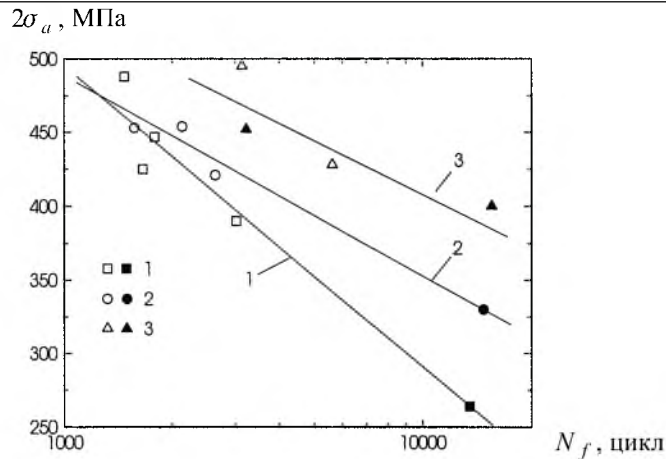


Рис. 7. Кривые малоциклового усталости в неизотермических условиях исследуемых сталей при нагреве по трапецеидальному режиму 200...800°C.

Отметим, что в диапазоне долговечностей до  $2 \cdot 10^3$  цикл легирование исходной стали X14H20 кремнием практически не влияет на долговечность. С увеличением долговечности от  $2 \cdot 10^3$  до  $1 \cdot 10^4$  цикл ограниченный предел выносливости ( $2\sigma_a$ ) легированной стали на 22,8% выше, чем исходной. Легирование исходной стали вольфрамом повышает ограниченный предел выносливости во всем исследованном диапазоне долговечностей на 20...40%.

**Заключение.** Полученные экспериментальные данные о влиянии легирования исходной стали X14H20 кремнием или вольфрамом на характеристики кратковременной и длительной статической и циклической прочности, а также на вид разрушения в неизотермических условиях свидетельствуют о сложном характере этого явления. Однако при легировании исходной стали X14H20 кремнием или вольфрамом однозначно прослеживается достаточно четкое повышение кратковременной статической прочности при температуре 800°C. Исследования влияния легирующих элементов на длительную прочность в неизотермических условиях при нагреве по трапецеидальному режиму 200...800°C показали, что легирование исходной стали X14H20 кремнием не оказывает существенного влияния на длительную прочность, а легирование вольфрамом – повышает эту характеристику. Исследования влияния легирующих элементов на характеристики сопротивления малоциклового неизотермическому нагружению и вид разрушения свидетельствуют о том, что легирование исходной стали кремнием повышает ограниченный предел выносливости только в диапазоне долговечностей свыше  $2 \cdot 10^3$  цикл и практически не влияет на склонность к формоизменению в отличие от легирования вольфрамом, которое приводит к более существенному повышению обеих характеристик во всем исследованном диапазоне долговечностей.

Проведение аналогичных исследований совместно с физическими позволяет на основе химического состава предварительно оценивать сопротивление материалов неизотермическому нагружению и в перспективе по содержанию легирующих элементов в стали судить о ее сопротивлении разрушению при циклическом воздействии температур и механических нагрузок, а также перейти к проектированию материалов с заданными свойствами для конкретных условий эксплуатации.

## Резюме

Представлено результаты экспериментальных исследований влияния легирования конструкционной стали X14H20 в начальном состоянии кремнием (3%) или вольфрамом (4%) на характеристики опоры коротко- и долговременной статической и циклической нагрузки в неизотермических условиях. Достаточно четко прослеживается повышение характеристик коротко- и долговременной статической прочности, а также характеристик опоры малоциклового неизотермического нагружения в большей мере от легирования вольфрамом и в меньшей мере – кремнием.

1. Гопкало А. П. Закономерности пластического деформирования сталей 15ХМл и 20ХМл при их термоциклическом нагружении // Пробл. прочности. – 1979. – № 9. – С. 48 – 51.
2. Синявский Д. П., Гопкало А. П. Исследование термической усталости хромомолибденовых сталей, применяемых в конструкциях агломерационных и обжиговых машин // Там же. – № 11. – С. 9 – 11.
3. Троценко В. Т., Синявский Д. П., Гопкало А. П. К вопросу о критериях разрушения металлов в условиях неизотермического нагружения. Сб. общ. 2 // Там же. – 1981. – № 12. – С. 9 – 14.
4. Троценко В. Т., Синявский Д. П., Гопкало А. П. и др. Исследование влияния содержания азота в сталях на характеристики сопротивления статическому и малоцикловому неизотермическому нагружению // Сб. докл. Нац. науч.-техн. конф. “Высокоазотистые стали 89” (Варна, окт. 1989). – Варна, 1989. – Т. 1. – С. 114 – 116.
5. Георгиев Н., Рашева Ив., Синявский Д. П., Гопкало А. П. Якоост и пластичност на штампови стомани с повишена топлоустойчивост, легиранни с азот при кратковременно и продължително статическо натоварване в неизотермични условия // Там же. – Т. 2. – С. 15 – 16.
6. Гопкало А. П. Прочность и долговечность конструкционной стали 15Х11МФБл в условиях теплосмен // Пробл. прочности. – 2001. – № 3. – С. 57 – 70.
7. Гопкало А. П., Заслоцкая Л. А., Синявский Д. П. и др. Методические особенности экспериментальных исследований термической усталости металлов // Там же. – 1980. – № 9. – С. 25 – 30.
8. Синявский Д. П., Стрижало В. А. О механизме накопления повреждения в материалах при термической усталости // Там же. – 1976. – № 4. – С. 16 – 22.

9. *Синявский Д. П., Гонкало А. П.* Прочность и долговечность материалов при малоцикловом неизотермическом нагружении. – Киев, 1984. – 66 с. (Препр. / АН УССР. Ин-т пробл. прочности).
10. *Синявский Д. П., Гонкало А. П.* О влиянии параметров нагружения на закономерности формоизменения жаропрочного сплава ЭИ-617 в условиях циклического изменения температуры // Пробл. прочности. – 1975. – № 12. – С. 47 – 49.

Поступила 15. 10. 99