

Упрочняемость сталей и сплавов как фактор снижения расхода металлоемкости промышленных конструкций

Э. В. Чечин

Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

Предложено использовать энергетический метод расчета прочности сталей и сплавов на основе комплекса их механических характеристик. Разработанный аналитический механизм обеспечивает дифференцированный подход к определению коэффициентов запаса прочности материалов, что, в свою очередь, позволяет снижать металлоемкость конструкций.

Ключевые слова: коэффициент запаса прочности, энергетический метод, энергопоглощение, допускаемые напряжения.

Введение. Снижение металлоемкости конструкций с сохранением требуемого уровня надежности всегда было одной из главных проблем машиностроения и строительства. Для решения этой проблемы используются различные подходы: применение более прочных и пластичных сталей и сплавов, создание прогрессивных конструкций и разработка новых, более совершенных методов расчета их прочности. Последнее направление, как известно, является наиболее перспективным.

Традиционный метод расчета прочности конструкционных материалов по допускаемым напряжениям неоднократно модифицировали, что вызвано широким применением пластичных сталей и сплавов в строительстве и машиностроении. Эти материалы обеспечивают более высокий уровень надежности конструкций по сравнению с высокопрочными, но малопластичными. Ранее были разработаны такие методы расчета на прочность, как расчет по разрушающим нагрузкам (1938 г.) и расчет строительных конструкций по предельным состояниям (1955 г.) с утверждением соответствующих норм проектирования.

Однако выполненные модификации метода расчета по допускаемым напряжениям не устранили всех его недостатков. Так, до сих пор в машиностроении используются одинаковые коэффициенты запаса прочности (КЗП) для различных конструкционных материалов с широким диапазоном отношения $\sigma_{\text{в}}/\sigma_{0,2}$ (рис. 1). Таким образом действующие нормативные документы не учитывают различий пластичности, упрочняемости и трещиностойкости сталей и сплавов. Это не позволяет использовать в полной мере реальные прочностные свойства пластичных упрочняющихся материалов при создании более надежных конструкций. Для таких материалов следовало бы дифференцированно устанавливать меньшие КЗП по сравнению с нормативными, что соответственно увеличивало бы значения расчетных напряжений и снижало металлоемкость и стоимость изготавливаемых конструкций.

Для эффективного использования самых дорогостоящих и дефицитных материалов (аустенитных сталей и цветных металлов и сплавов) в 80-е годы прошлого столетия в развитых странах без всякого научного обоснования их

КЗП были уменьшены с 1,5 до 1,3 и менее. Было также предложено определять допускаемые напряжения по отношению $[\sigma] = \sigma_{1,0}/1,5$, где $\sigma_{1,0}$ – минимальное значение условного предела текучести при 1%-ном остаточном удлинении и расчетной температуре. Другие достаточно пластичные упрочняющиеся стали и сплавы, для характеристики которых диаграмма Прандтля неприемлема, продолжают использоваться с привлечением существующих норм.

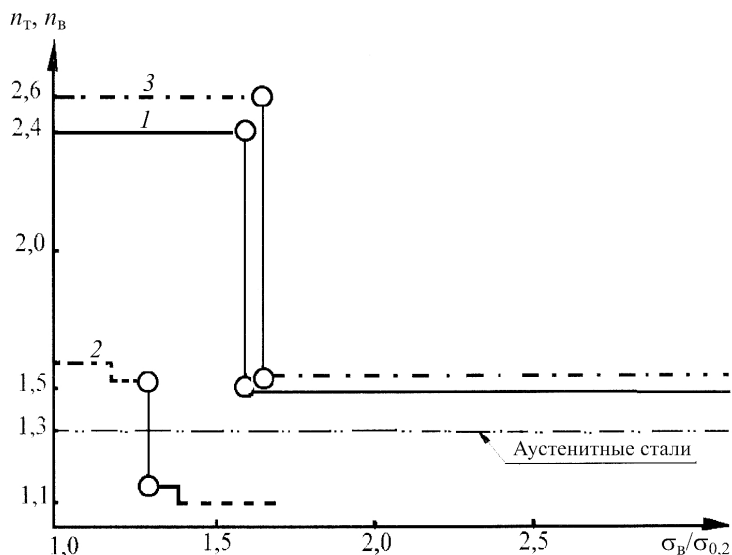


Рис. 1. Зависимость нормативных коэффициентов запаса прочности от отношения характеристик прочности в различных отраслях промышленности: 1 – машиностроение; 2 – строительство; 3 – энергетическое машиностроение.

Таким образом разработка более точного и физически обоснованного метода определения допускаемых напряжений на основе новой энергетической концепции, включающей комплекс основных механических свойств материалов – пластичности, деформационного и низкотемпературного упрочнения, а также трещиностойкости, т.е. тех свойств, которые обеспечивают фактический запас прочности и надежности конструкций, стала весьма актуальной [1–5].

Подобный метод позволит также безопасно использовать низкотемпературное упрочнение хладостойких сталей и сплавов, применяемых в криогенной технике, поскольку в условиях криогенных температур прочность материалов увеличивается, а их пластичность и трещиностойкость снижаются.

Дифференцированное определение коэффициента запаса прочности материала. Энергетический метод состоит в том, что допускаемые напряжения, главное звено расчета на прочность, определяют на основе комплекса механических характеристик материалов – пластичности, упрочняемости (деформационной и низкотемпературной), а также трещиностойкости каждого материала. Разработанный аналитический механизм позволяет получить значения допускаемых (расчетных) напряжений, большие нормативных, что обеспечивает снижение расхода металла. Это равнозначно назначению дифференцированно меньших для каждого материала КЗП, которые теперь из величин постоянных становятся зависимыми от комплекса основных механических свойств.

В качестве критерия работоспособности пластичных сталей и сплавов выбрана удельная энергия пластической деформации в равномерной зоне (энергопоглощение материала). Эту энергию при описании диаграммы деформирования материала степенным уравнением $\sigma = A\varepsilon^n$, справедливым для многих конструкционных сталей и сплавов, можно определить по формуле

$$W_B = \int_0^{\varepsilon_B} \sigma d\varepsilon = \int_0^{\varepsilon_B} A\varepsilon^n d\varepsilon = \frac{A\varepsilon_B^{n+1}}{1+n}, \quad (1)$$

где A и n – константы материала (A – коэффициент прочности, n – показатель деформационного упрочнения); ε_B – равномерная относительная пластическая деформация. Вычисление W_B можно производить с использованием истинных или условных напряжений и деформаций, применяя при переходе от условных к истинным величинам известные соотношения.

Для инженерных расчетов можно использовать кусочно-линейную аппроксимацию диаграммы деформирования и определять энергопоглощение с учетом предела текучести, предела прочности и равномерной относительной деформации

$$W_B = (\sigma_{0,2(T)} + \sigma_B) \varepsilon_B / 2, \quad (2)$$

где $\sigma_{0,2(T)}$, σ_B – пределы текучести и прочности.

Для оценки фактического запаса прочности конструкционных материалов, обусловленного деформационным упрочнением, а также тем, что допускаемые напряжения составляют определенную часть предела текучести материала (в зависимости от величины принятого в данной отрасли промышленности коэффициента запаса прочности), общее энергопоглощение материала (1) представим в виде трех составных частей (рис. 2).

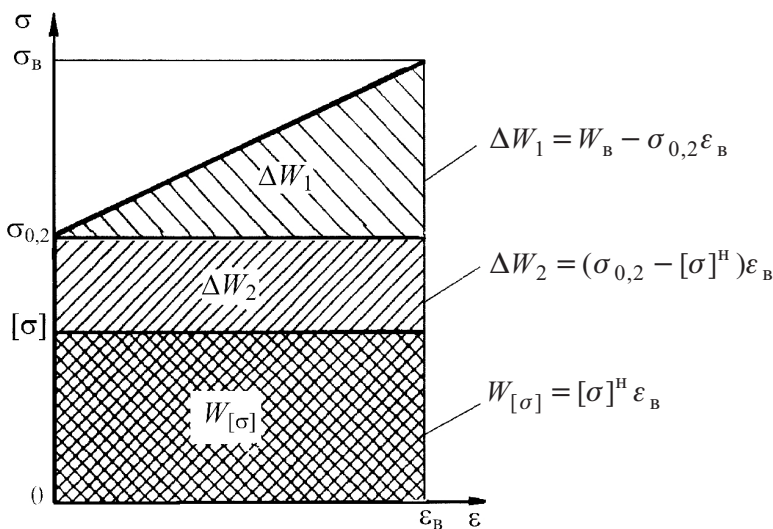


Рис. 2. Составные части удельной работы пластической деформации материала.

Здесь $W_{[\sigma]} = [\sigma]^H \varepsilon_B$ – “используемая” часть энергопоглощения (на уровне допускаемых нормативных напряжений); $\Delta W_2 = (\sigma_{0,2} - [\sigma]^H) \varepsilon_B$ – неиспользуемый резерв энергопоглощения, численное значение которого равно разности величин площадей на уровнях предела текучести и допускаемого напряжения; $\Delta W_1 = W_B - \sigma_{0,2} \varepsilon_B$ – резерв энергопоглощения материала, обусловленный деформационным упрочнением.

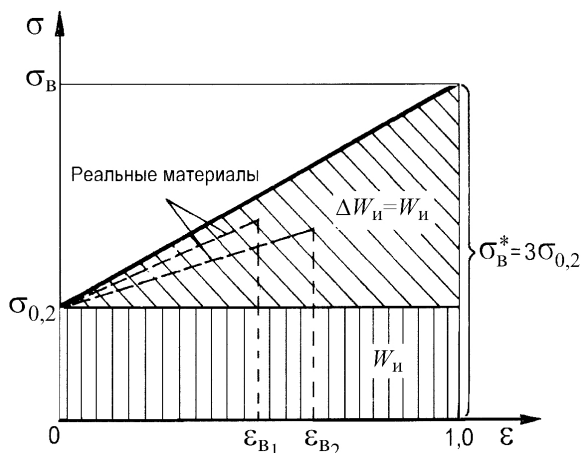


Рис. 3. Схематическая диаграмма деформирования идеально упрочняющегося материала.

Для сравнения конструкционных материалов с разными резервами энергопоглощения удобнее пользоваться обобщенными энергетическими параметрами. Для этого в качестве эталонного материала принят идеально упрочняющийся материал (рис. 3), у которого при равномерной деформации $\varepsilon_B = 1,0$ энергопоглощение, обусловленное деформационным упрочнением, равно его энергопоглощению без упрочнения ($\Delta W_{и} = W_{и} = \sigma_{0,2} \cdot 1,0$). Тогда обобщенный энергетический параметр β_1 , характеризующий способность конструкционного материала к деформационному упрочнению при комнатной температуре, определяем как отношение

$$\beta_1 = \frac{\Delta W_1}{W_{и}} = \frac{(\sigma_B - \sigma_{0,2}) \varepsilon_B / 2}{\sigma_{0,2} \cdot 1,0} = (\sigma_B / \sigma_{0,2} - 1) \varepsilon_B / 2. \quad (3)$$

Анализ способности конструкционных сталей и сплавов к упрочнению показал, что с увеличением отношения $\sigma_B / \sigma_{0,2}$ их энергетический параметр β_1 также возрастает. Этот параметр изменяется в диапазоне от 0 до 1,0, т.е. при $\beta_1 > 0$ материал обладает определенным запасом пластичности и упрочняемости, который следует использовать для повышения нормативного значения допускаемого напряжения путем определения поправки, учитывающей деформационное упрочнение материала (см. ниже).

Параметр β_1 коррелирует с отношением $\sigma_B / \sigma_{T(0,2)}$, что позволяет систематизировать материалы по их механическим свойствам. Зависимость $-\ln \beta - \sigma_B / \sigma_{0,2}$ в полулогарифмических координатах достаточно хорошо

описывается прямой линией, полученной в результате обработки данных по методу наименьших квадратов для ряда конструкционных сталей и сплавов различных классов прочности (рис. 4). Данную зависимость можно принять за универсальную диаграмму упрочняемости металлических материалов. Это подтверждается, например, тем, что переход таких широко применяемых сталей, как 2Х13, 35ХМА и 30ХГСА, из отожженного состояния в закаленное с последующим отпуском происходит “скольжением” вдоль диаграммы упрочняемости материалов (рис. 4).

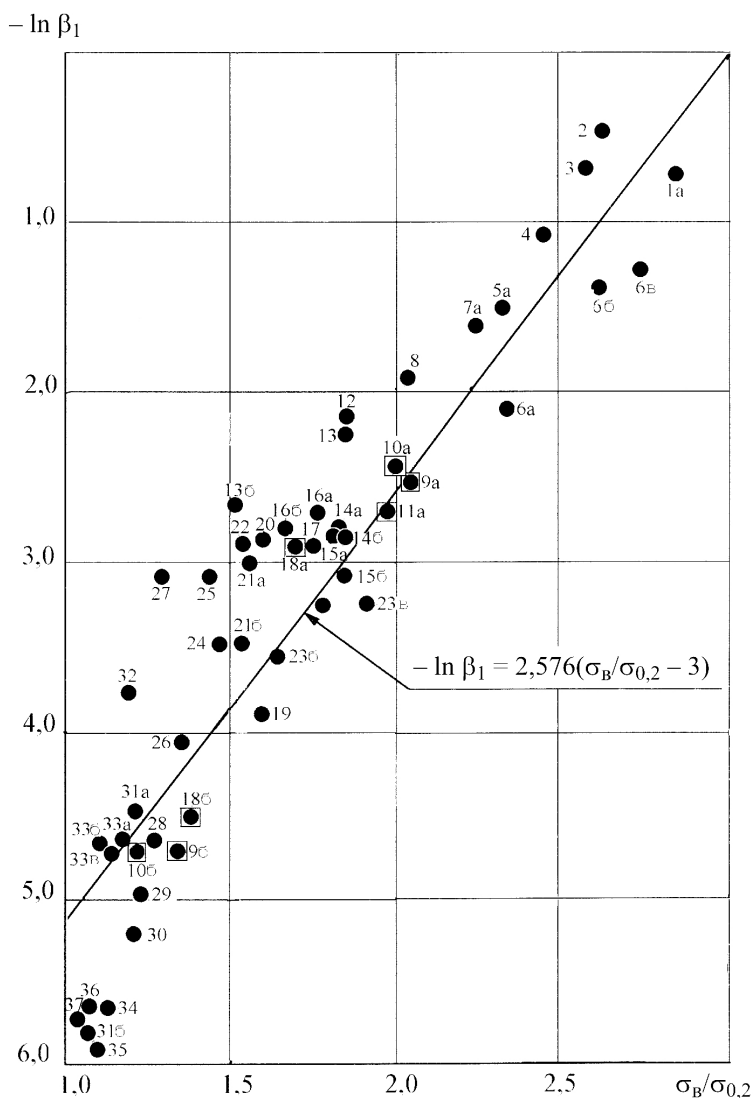


Рис. 4. Зависимость $-\ln \beta_1 - \sigma_B/\sigma_{0,2}$ для конструкционных материалов.

Таким образом установленная зависимость деформационного упрочнения конструкционных материалов от отношения их прочностных характеристик служит основой для выявления скрытых резервов прочности и использования их в расчетах, а также позволяет оптимизировать механические

свойства различных сталей и сплавов металлургическим или технологическим способами (приближая их к диаграмме).

Энергетический параметр β_2 , характеризующий “неиспользуемый” резерв энергопоглощения материала и зависящий от принятого в данной отрасли промышленности нормативного коэффициента запаса прочности (номинального напряжения), определяем как

$$\beta_2 = \frac{\Delta W_2}{W_{\text{н}}} = \frac{(\sigma_{0,2} - [\sigma]^{\text{H}})\varepsilon_{\text{в}}}{\sigma_{0,2} \cdot 1,0} = (1 - [\sigma]^{\text{H}}/\sigma_{0,2})\varepsilon_{\text{в}}. \quad (4)$$

Определение энергетических параметров β_1^t и β_2^t при криогенных температурах аналогично их определению при комнатной температуре, однако составляющие энергопоглощения при криогенных температурах сопоставляем с величиной $W_{\text{н}}$, полученной при комнатной температуре

$$\beta_1^t = \frac{\Delta W_1^t}{W_{\text{н}}} = \frac{(\sigma_{\text{в}}^t - \sigma_{0,2}^t)\varepsilon_{\text{в}}^t/2}{\sigma_{0,2} \cdot 1,0} = \frac{(\sigma_{\text{в}}^t - \sigma_{0,2}^t)\varepsilon_{\text{в}}^t}{2\sigma_{0,2}}, \quad (5)$$

$$\beta_2^t = \frac{\Delta W_2^t}{W_{\text{н}}} = \frac{\sigma_{0,2}^t\varepsilon_{\text{в}}^t - [\sigma]^{\text{H}}\varepsilon_{\text{в}}}{\sigma_{0,2}}. \quad (6)$$

Допускаемые напряжения по энергетическому методу при комнатной температуре определяем, зная обобщенные энергетические параметры β_1 и β_2 , характеризующие резервы энергопоглощения сталей и сплавов, и вычислив поправки к номинальному значению допускаемых напряжений (определенному по традиционному методу) в виде суммы

$$[\sigma]^{\text{э}} = [\sigma]^{\text{H}} + [\Delta\sigma]_1 + [\Delta\sigma]_2. \quad (7)$$

При этом для различных отраслей промышленности исходное (номинальное) значение $[\sigma]^{\text{H}}$ может уточняться независимо от рассматриваемого метода.

Для определения первой поправки $[\Delta\sigma]_1$, характеризующей деформационное упрочнение, сравнивали поправки для реального и идеально упрочняющегося материалов, соблюдая энергетическое подобие сравниваемых величин. Были получены аналитические зависимости для определения поправок к номинальному допускаемому напряжению, рассчитываемому соответственно по пределу текучести “т” или пределу прочности “в”, пропорционально энергетическим параметрам β_1 и β_2 . Процедуры определения поправок и разработки аналитического механизма преобразования качественных характеристик материалов в расчетные описаны в [1, 2, 8]. Эти зависимости имеют вид:

$$[\Delta\sigma]_{1,\text{т}} = \frac{(\sigma_{\text{в}} - \sigma_{0,2})\beta_1}{2n_{\text{т}}/(n_{\text{т}} - 1)}; \quad [\Delta\sigma]_{1,\text{в}} = \frac{(\sigma_{\text{в}} - \sigma_{0,2})\beta_1}{2n_{\text{в}}/(n_{\text{в}} - \sigma_{\text{в}}/\sigma_{0,2})}. \quad (8)$$

Вторую поправку $[\Delta\sigma]_2$, учитывающую резерв прочности материала, обусловленный превышением предела текучести над выбранным значением номинального допускаемого напряжения, определяем как

$$[\Delta\sigma]_{2,T} = \frac{\Delta\sigma_2}{n_T} = \frac{(\sigma_{0,2} - [\sigma]_T^H)\beta_2}{n_T}; \quad [\Delta\sigma]_{2,B} = \frac{\Delta\sigma_2}{n_B} = \frac{(\sigma_{0,2} - [\sigma]_B^H)\beta_2}{n_B}. \quad (9)$$

В развернутом виде уравнение (6) принимает вид

$$[\sigma]_T^p = \min \left\{ \frac{\sigma_{0,2}}{n_T} + \frac{(\sigma_B - \sigma_{0,2})\beta_1}{2n_T/(n_T - 1)} + \frac{(\sigma_{0,2} - [\sigma]_T^H)\beta_2}{n_T}; \right. \\ \left. \frac{\sigma_B}{n_B} + \frac{(\sigma_B - \sigma_{0,2})\beta_1}{2n_B/(n_B - \sigma_B/\sigma_{0,2})} + \frac{(\sigma_{0,2} - [\sigma]_B^H)\beta_2}{n_B} \right\}. \quad (10)$$

Видно, что при равенстве параметров β_1 и β_2 нулю определение допускаемых напряжений соответствует традиционному силовому методу, вследствие этого он является частным случаем энергетического метода. Таким образом, снижение расхода металла при определении допускаемых напряжений по энергетическому методу пропорционально увеличению $[\sigma]^p$ по отношению к $[\sigma]^H$ (таблица). Отметим также, что повышение допускаемых напряжений и агрессивная окружающая среда могут вызывать ухудшение усталостных характеристик материалов, однако степень такого ухудшения необходимо анализировать в каждом конкретном случае.

Дифференцированные коэффициенты запаса прочности для ряда сталей

№ п/п	Материал	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	ϵ_B	$[\sigma]^H$, МПа	$\frac{[\sigma]^p - [\sigma]^H}{[\sigma]^H}, \%$	n^3
1	0X14AG12M	435	1118	0,65	290	27,0	1,09
2	1X18H9T	300	670	0,55	200	16,5	1,25
3	12X18H10T	240	540	0,32	160	9,8	1,35
4	30X10Г10	397	815	0,27	265	6,7	1,40
5	09Г2С	343	602	0,18	229	3,3	1,45
6	20	224	389	0,22	149	4,0	1,44
7	Ст. 3	300	480	0,13	200	2,0	1,47
8	A516	364	523	0,21	218	3,6	2,31
9	15Г2АФДпс	410	532	0,30	222	5,5	2,27
10	ЭП810	800	950	0,10	396	2,2	2,35

Допускаемые напряжения при криогенных температурах определяем также в виде суммы исходного номинального напряжения, определенного при комнатной температуре, и поправок, учитывающих резервы деформационного и низкотемпературного упрочнения (повышения пределов текучести и

прочности, а также снижения трещиностойкости) при криогенных температурах:

$$[\sigma]^{3,t} = [\sigma]^H + ([\Delta\sigma]_1^t + [\Delta\sigma]_2^t)\beta_{J(K,\delta)}^t. \quad (11)$$

Поправки $[\Delta\sigma]_1^t$ и $[\Delta\sigma]_2^t$ определяем аналогично (8) и (9) [8].

Для учета изменения вязкости разрушения при криогенных температурах дополнительно введен коэффициент $\beta_{J(K,\delta)}^t$, равный отношению критических значений J -интеграла при низкой и комнатной температурах ($\beta_J^t = J_{1c}^t/J_{1c}$), отношению критических значений коэффициентов интенсивности напряжений ($\beta_K^t = K_{1c}^t/K_{1c}$) или отношению критических значений раскрытия трещин ($\beta_\delta^t = \delta_c^t/\delta_c$).

В результате уравнение (11) принимает вид:

$$[\sigma]^{3,t} = \min \left\{ \frac{\sigma_{0,2}}{n_T} + \left[\frac{(\sigma_B^T - \sigma_{0,2}^T)\beta_1^t}{n_T^{H,T}} + \frac{(\sigma_{0,2}^T - [\sigma]_T^H)\beta_2^t}{n_T} \right] \beta_{J(\delta,k)}^t; \right. \\ \left. \frac{\sigma_B}{n_B} + \left[\frac{(\sigma_B^T - \sigma_{0,2}^T)\beta_1^t}{n_B^{H,T}} + \frac{(\sigma_{0,2}^T - [\sigma]_B^H)\beta_2^t}{n_B} \right] \beta_{J(\delta,k)}^t \right\}. \quad (12)$$

Используя энергетический метод определения допускаемых напряжений, можно установить и достаточные (безопасные) значения КЗП для каждого конструкционного материала при любой температуре, исключаяющей его переход в хрупкое состояние

$$n^3 = \frac{\sigma_{0,2(B)}}{[\sigma]^H + [\Delta\sigma]_1 + [\Delta\sigma]_2} = \frac{\sigma_{0,2(B)}}{[\sigma]^3}. \quad (13)$$

Таким образом, чем больше величина поправок $[\Delta\sigma]_1$ и $[\Delta\sigma]_2$ для конкретного материала, тем меньший безопасный КЗП может быть для него установлен. Такой подход позволяет заменить действующие строго детерминированные по отраслям промышленности КЗП на дифференцированные для каждого материала.

Данные табл. и рис. 5 (для комнатной температуры) демонстрируют зависимость достаточных величин КЗП от отношения $\sigma_B/\sigma_{0,2}$ материалов, показывая существенное их отличие от нормативных.

В [4–8] приведены результаты испытаний при статическом и циклическом нагружении внутренним давлением натуральных изделий и крупногабаритных сварных моделей сосудов давления, как наиболее ответственных конструкций.

Эти испытания позволили получить достоверные результаты о разрушающих напряжениях, деформациях (общих и локальных), а также о циклической прочности конструкций и реальных КЗП. Установлено, что экспери-

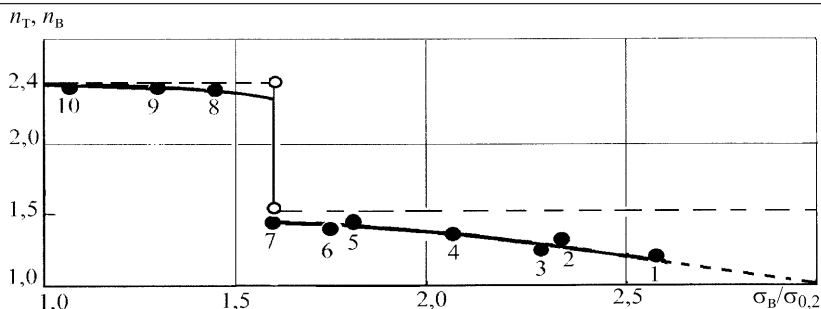


Рис. 5. Зависимость дифференцированных коэффициентов запаса прочности от отношения $\sigma_B/\sigma_{0,2}$. (Точки – расчетные значения n^3 для ряда широко применяемых сталей: 0X14AГ12М (1); 1X18Н9Т (2); 12X18Н10Т (3); 30X10Г10 (4); 09Г2С (5); Ст. 3 (6); А516 (8); 15Г2АФДпс (9); ЭП810 (10).)

ментальные значения КЗП, определенные как $n_{\text{эКП}} = \sigma_{\text{разр}}/[\sigma]^3$, при комнатной и криогенных температурах превышают нормативные значения КЗП, подтверждая избыточную прочность конструкций, рассчитанных по энергетическому методу.

Заключение. Расчеты с помощью энергетического метода позволяют выявлять скрытые резервы прочности многих пластичных упрочняющихся и хладостойких сталей и сплавов, а не только аустенитных и цветных, для которых КЗП были уменьшены ранее, что обеспечило снижение их расхода в промышленности. Общее снижение расхода указанных сталей и сплавов без ущерба для надежности конструкций в промышленно развитых странах в год может достигать значительных объемов. При этом, кроме экономической выгоды, будет улучшена и экология вследствие сокращения выбросов в атмосферу вредных веществ металлургического производства.

Резюме

Запропоновано використувувати енергетичний метод розрахунку міцності сталей і сплавів на основі комплексу їх механічних характеристик. Розроблений аналітичний механізм забезпечує диференційний підхід до визначення коефіцієнтів запаса міцності матеріалів, що, в свою чергу, дозволяє зменшити металомісткість конструкцій.

1. Чечин Э. В. Использование деформационного и низкотемпературного упрочнения материалов с большим запасом энергопоглощения для повышения допускаемых напряжений // Прочность материалов и конструкций при низких температурах. – Киев: Наук. думка, 1984. – С. 249 – 258.
2. Чечин Э. В. Систематизация конструкционных материалов по уровню деформационного упрочнения и разработка энергетического метода определения допускаемых напряжений и запасов прочности. Сообщ. 1. Энергетические параметры и универсальная диаграмма упрочняемости материалов. Сообщ. 2. Определение допускаемых напряжений с учетом резервов упрочняющихся материалов // Пробл. прочности. – 1992. – № 2. – С. 48 – 53; 54 – 61.

3. *Chechin E. V.* Energy-based method for determination of stresses. Pt. I & II // Int. J. Press. Vess. Piping. – 1995. – **62**. – P. 87 – 101.
4. *Chechin E. V.* Reduction of metal consumption in engineering structures attainable by the energy-based method for strength analysis // Ibid. – 1997. – **71**, No. 3. – P. 253 – 261.
5. *Чечин Э. В.* Расчет конструкций на прочность с учетом ресурсов пластичности и упрочняемости металлов // Пробл. машиностроения и надежности машин. – 1999. – № 2. – С. 41 – 52.
6. *Chechin E. V.* Saving ductile metals in strength analysis by the energy-based method for structures in mechanical and civil engineering // Advances in Fracture Research (Proc. of ICF 10), Paper 95. – Oxford: Elsevier, – 2001.
7. *Chechin E. V.* A way to put an end to an unjustified overconsumption of plastic steels and alloys in industry // Proc. 11th Int. Conf. on Fracture (March 20–25, 2005, Turin). – 2005.
8. *Чечин Э. В.* Прочность и металлоемкость оболочечных конструкций при криогенных температурах. – Киев: Ин-т пробл. прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, 2008. – 184 с.

Поступила 14. 10. 2010