

УДК 620.193.4

**Ю. Б. ДАНИЛОВ, Л. П. ПЕРЦЕВ****ТРЕБОВАНИЯ К ВЫБОРУ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ И ИЗГОТОВЛЕНИИ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ.**

У статті показані основні вимоги які необхідно врахувати при проектуванні і виготовленні посудин та апаратів, працюючих в хімічній і нафтогазовій промисловості, енергетиці, при підвищених тисках, температурах, корозійних середовищах. Показано вплив різних факторів на вибір конструкційних матеріалів: зовнішніх і внутрішніх робочих умов, пов'язаними з властивостями даного матеріалу. До факторів першої групи відносяться температура, тиск, швидкість руху і властивості середовища, особливості технологічного процесу, можливі домішки, атмосферна вологість і забруднення атмосфери. До другої групи факторів належать фізико-механічні і технологічні властивості матеріалів. Найбільш важливими характеристиками механічних властивостей, при виборі матеріалів є, як відомо, межа міцності або тимчасовий опір  $\sigma_b$ , межа текучості  $\sigma_T$ , відносне подовження  $\delta$ , відносне звуження  $\psi$ , модуль пружності при розтягуванні  $E$  (модуль подовжньої пружності), коефіцієнт Пуассона  $\mu$ , ударна в'язкість  $a_n$ , повзучість. Знання зазначених факторів дозволяє конструктору розробляти надійне, технологічне обладнання.

**Ключові слова:** температура, тиск, механічні властивості, пластичність, межа плинності, ударна в'язкість, допустима напруга, повзучість, модуль пружності.

В статье показаны основные требования которые необходимо учитывать при проектировании и изготовлении сосудов и аппаратов работающих в химической и нефтегазовой промышленности, энергетике, при повышенных давлениях, температурах, коррозионных средах. Показано влияние различных факторов на выбор конструкционных материалов: внешних и внутренних рабочих условий, связанными со свойствами данного материала. К факторам первой группы относятся температура, давление, скорость движения и свойства среды, особенности технологического процесса, возможные примеси, атмосферная влажность и загрязненность атмосферы. Ко второй группе факторов относятся физико-механические и технологические свойства материалов. Наиболее важными характеристиками механических свойств, при выборе материалов являются, как известно, предел прочности или временное сопротивление  $\sigma_b$ , предел текучести  $\sigma_T$ , относительное удлинение  $\delta$ , относительное сужение  $\psi$ , модуль упругости при растяжении  $E$  (модуль продольной упругости), коэффициент Пуассона  $\mu$ , ударная вязкость  $a_n$ , ползучесть. Знание указанных факторов позволяет конструктору разрабатывать надежное, технологичное оборудование.

**Ключевые слова:** температура, давление, механические свойства, пластичность, предел текучести, ударная вязкость, допустимое напряжение, ползучесть, модуль упругости.

The article shows the main requirements to consider in the design and manufacture of vessels and apparatus working in the chemical and oil industry, energy, at elevated pressures, temperatures, corrosive environments. Shows the effect of different factors on the choice of construction materials: external and internal operating conditions associated with properties of this material. The factors of the first group are temperature, pressure, velocity and properties of the environment, the features of the technological process, possible impurities, atmospheric humidity and atmospheric pollution. The second group of factors include the physico-mechanical and technological properties of materials. The most important characteristics of mechanical properties in materials are known, the tensile strength or the tensile strength  $\sigma_b$ ,  $\sigma_T$  yield strength, relative elongation  $\delta$ , relative narrowing  $\psi$ , modulus of elasticity in tension  $E$  (modulus of elasticity), Poisson's ratio  $\mu$ , the impact strength  $a_n$ , creep. Knowledge of these factors allows the designer to develop a reliable, technologically advanced equipment.

**Keywords:** temperature, pressure, mechanical properties, ductility, yield strength, impact strength, allowable stress, creep, modulus of elasticity

**Вступлення.** При проектуванні і виготовленні обладнання для хімічної, нафтогазової промисловості, енергетики важно конструкційні матеріали вибирати, руководствуясь следующими требованиями и соображениями: пригодностью для применения в заданных условиях эксплуатации, соответствием стандартам и нормам, освоенностью промышленностью, экономической целесообразностью. В свою очередь, пригодность материала к работе характеризуется тремя основными качествами – коррозионной стойкостью, прочностью при заданной температуре и технологичностью изготовления. В мировой практике известны два подхода к выбору материалов – американский и европейский. В США структура налогового обложения поощряет создание установок, имеющих низкие капитальные затраты, а, следовательно, в проекты закладываются наиболее дешевые конструкционные материалы, но при этом повышаются расходы на эксплуатацию и ремонт оборудования. В Европе же, налоговая система способствует созданию установок с более высокими капитальными затратами, но обеспечивает повышенную надежность и меньшие расходы на ремонт и эксплуатацию.

Исследователи и конструкторы в Советском Союзе при выборе материалов традиционно исходили из европейской концепции, что, возможно, в известной мере предопределило повышенную работоспособность действующего оборудования на постсоветском пространстве, хотя оно практически выработало заложенный ресурс.

**Факторы влияющие на выбор материалов.** Современный выбор материалов для изготовления нефтегазохимической аппаратуры и оборудования определяется рядом факторов, которые можно разделить на две группы:

- зависящих от внешних и внутренних рабочих условий;

- связанных со свойствами данного материала.

К факторам первой группы относятся температура, давление, скорость движения и свойства среды, особенности технологического процесса, возможные примеси, атмосферная влажность и загрязненность атмосферы. Температура, как известно, влияет на механические свойства материала. При повышении температуры ухудшаются механические свойства металлов.

© Ю.Б. Данилов, Л.П. Перцев 2016

Так, при температуре выше 500 °С механические свойства углеродистых сталей настолько снижаются, что применение их становится нерациональным. Правилами Госгоратомнадзора и требованиями государственных и европейских стандартов не допускается применение углеродистой стали для аппаратов, работающих под давлением при температуре стенки выше 475 °С. Механические свойства легированных сталей при повышении температуры ухудшаются менее резко, поэтому их использование в этих условиях более рационально. При повышении температуры интенсифицируются коррозионные процессы. Так, высокотемпературная сернистая коррозия, как известно, становится заметной, начиная с температуры 250 °С. Снижение температуры стенки ниже 0 °С также вызывает изменение механических свойств материалов.

При повышенных давлениях предъявляются более жесткие требования к качеству стали. Углеродистые конструкционные стали обыкновенного качества разрешается применять для аппаратов, работающих под давлением до 5 МПа, при больших давлениях следует использовать стали с более высокими механическими свойствами и пониженным содержанием серы, фосфора и других вредных примесей, обычно приводящих к интенсификации коррозии. Так, при значительных давлениях в присутствии водорода углеродистые стали подвергаются водородной коррозии.

При выборе материалов необходимо учитывать коррозионное и эрозионное воздействие среды. В этой связи, часто возникают трудности в выборе сталей недефицитных марок; например, при недостаточно полной очистке сырья от солей и воды в некоторых процессах нефтепереработки, для изготовления конденсационно-холодильной аппаратуры затруднительно подобрать стали, обеспечивающие достаточно длительный срок службы аппарата. Повышенные требования предъявляются при выборе материалов для изготовления аппаратов, предназначенных для работы со взрывоопасными веществами.

Ко второй группе факторов относятся физико-механические и технологические свойства материалов.

Наиболее важными характеристиками механических свойств, при выборе материалов

являются, как известно, предел прочности или временное сопротивление  $\sigma_b$ , предел текучести  $\sigma_t$ , относительное удлинение  $\delta$ , относительное сужение  $\psi$ , модуль упругости при растяжении  $E$  (модуль продольной упругости), коэффициент Пуассона  $\mu$ , ударная вязкость  $\alpha_n$ .

Кроме указанных механических характеристик, при выборе сталей для изготовления элементов аппаратуры, работающих при повышенных температурах, необходимо знать такие свойства, как ползучесть и длительная прочность материала, склонность к тепловой хрупкости, релаксации, чувствительность к старению, стабильность структуры, а для аппаратуры, работающей при пониженных температурах – ударную вязкость, склонность к хладноломкости.

Из физических характеристик для выбора материалов важно знать также температурный коэффициент линейного расширения и коэффициент теплопроводности материала. Последний является важной характеристикой при конструировании теплообменной аппаратуры всех видов.

Наиболее важными технологическими свойствами материалов, которые следует учитывать при их выборе, являются свариваемость, обрабатываемость давлением и резанием. Помимо указанных факторов, при определении целесообразности применения того или иного материала необходимо, главным образом, учитывать экономические соображения.

Большинство аппаратов на химических и нефтеперерабатывающих заводах работает в условиях повышенных температур и давлений. Изменение механических свойств сталей при повышенных температурах следует учитывать при выборе допускаемых напряжений. Так, при повышении температуры предел текучести сталей падает, а поскольку рабочие напряжения не должны превышать предел текучести, и их выбирают с определённым запасом, то при повышении температуры допускаемые напряжения уменьшаются.

Изменение механических свойств различных углеродистых сталей с содержанием углерода до 0,4 % при повышенных температурах носит примерно одинаковый характер и может быть представлено в относительных единицах (табл.1).

Таблица 1. Механические свойства (%) углеродистых сталей с содержанием углерода до 0,4 %

Температура, °С	$\sigma_b$	$\sigma_t$	$\delta$	$\psi$	$E$	$\alpha_n$
20	100	100	100	100	100	100
100	100	95	80	95	98	110
200	120	85	55	80	95	115
300	115	70	80	90	90	110
400	90	58	100	100	85	85

Как видно из табл. 1.1, предел прочности с ростом температуры изменяется, увеличиваясь на 20% при температуре 200 °С и падая при дальнейшем увеличении температуры до 60% при 500 °С (следует отметить, что увеличение прочности при 200 °С в расчет не принимается).

С повышением температуры характер диаграммы растяжения углеродистой стали изменяется: явление текучести становится менее явным (рис.1) и при температуре примерно 300 °С площадка текучести исчезает. В этом случае свойства оценивают по так называемому условному пределу текучести, который определяют как напряжение, вызывающее заданную степень остаточной деформации (принято 0,2%). Отношение предел текучести к пределу прочности при нормальной температуре для низкоуглеродистых сталей определяется соотношением  $\sigma_T = (0,55 \div 0,60)\sigma_B$ .

При повышении температуры предел текучести падает в большей степени, чем предел прочности,

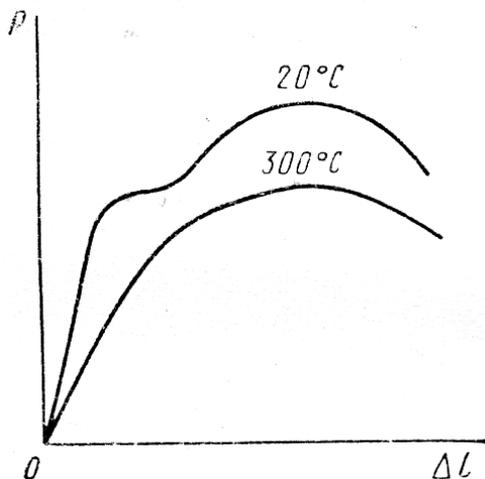


Рис. 1. Диаграмма растяжения стали:  
P – сила,  $\Delta l$  – линейная деформация

Для стали предел текучести при изгибе превышает предел текучести при растяжении и составляет при  $\sigma_T = 200 \div 500$  МПа для образцов прямоугольного сечения соответственно  $\sigma_{TI} = (1,44 \div 1,35)\sigma_T$ . Это объясняется неоднородностью напряженного состояния в условиях пластических деформаций при изгибе, когда эпюра напряжений характеризуется кривой 2 (рис. 2), а не прямой 1, как в условиях упругих деформаций. Для определения действительных напряжений в крайнем волокне при изгибе применяют формулы, соответствующие распределению напряжений по кривой.

Однако, поскольку формулы, применяемые для определения упругих напряжений, соответствуют прямолинейному закону распределения считается возможным до 15% повысить расчётное допускаемое значение изгибного напряжения в сравнении с допускаемым напряжением при растяжении.

поэтому допускаемое напряжение следует выбирать с учетом изменения предела текучести.

Величина предела текучести при изгибе определяется напряжением, которое вызывает в крайних волокнах остаточные деформации 0,2%.

Изгибающий момент (рис. 1.2)

$$M_u = \frac{P_T \cdot l}{4},$$

где  $P_T$  – сила, вызывающая остаточные деформации в крайних волокнах образца, равные 0,2%;

$l$  – пролёт образца.

Предел текучести при изгибе

$$\sigma_{TI} = \frac{P_T \cdot l}{4W},$$

где  $W$  – осевой момент сопротивления рассматриваемого сечения.

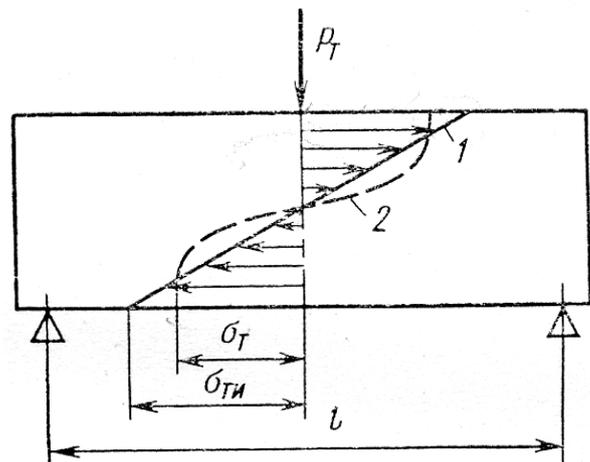


Рис. 2. Эпюра напряжений в сечении образца при изгибе: 1 – при упругих деформациях; 2 – при пластических деформациях

Если во всех точках поперечного сечения (рис. 2) будет достигнуто напряжение текучести, то наступит так называемое предельное состояние, при котором образуется шарнир пластичности. Предельный изгибающий момент, который может выдержать балка в этом случае, определяют как произведение предела текучести на пластический момент сопротивления  $W_n$ . Значение  $W_n$  для прямоугольного сечения высотой  $h$  и шириной  $b$ :  $W_n = b \cdot h^2 / 4$ ; момент сопротивления при упругих деформациях, когда напряжения изменяются линейно от нейтральной оси к крайним волокнам в сечении образца,  $W = b \cdot h^3 / 6$ . В этом случае следует брать требуемый по условиям работы коэффициент запаса прочности к предельному состоянию.

Характер изменения пластических свойств стали (относительного удлинения  $\delta$  и относительного сужения  $\psi$ ) при повышении температуры

противоположен изменению предела прочности (табл.1). С ростом температуры  $\delta$  и  $\psi$  вначале уменьшаются одновременно с некоторым увеличением предела прочности, а затем увеличиваются; сталь становится более пластичной, чем при нормальных условиях.

При выборе материалов по их характеристикам следует различать относительное удлинение образца пяти- и десятикратной расчетной длины, для которых соответственно:

$$l=5d \text{ или } l=5,65\sqrt{F} \text{ и } l=10d \text{ или } l=11,3\sqrt{F},$$

где  $d$  – диаметр образца;

$F$  – площадь поперечного сечения образца.

Значения относительного удлинения  $\delta_5$  и  $\delta_{10}$  различаются: для низкоуглеродистой стали  $\delta_5 \approx 1,16 \delta_{10}$ ; для углеродистых сталей с содержанием углерода не более 0,25 % обычно принимают  $\delta_{10} \geq 20\%$ .

Значения модуля упругости при растяжении и сдвиге – с повышением температуры падает (табл. 2).

Таблица 2. Модуль упругости  $E$  при растяжении (в функции температур)

Сталь	Значение $E \cdot 10^{-3}$ , МПа, при температуре °С				
	20	100	250	450	550
Углеродистая	1,99	1,91	1,76	1,40	-
Легированная аустенитного класса	2	2	1,94	1,75	1,61

Значения величин модуля упругости материала при различных температурах, в частности, необходимы при определении температурных напряжений в элементах аппаратуры, расчете на устойчивость форм аппаратов и их частей.

Для сталей, используемых при изготовлении сосудов и аппаратов, допускаемое значение ударной вязкости при нормальной и пониженных температурах ограничено минимальным пределом.

При воздействии высоких температур в условиях напряженного состояния в сталях возникают ползучесть и релаксация, протекающие с различной интенсивностью в зависимости от химического состава стали, ее структуры. Некоторые стали проявляют склонность к нарушению стабильности структуры.

Обычные методы кратковременных испытаний в условиях повышенных температур не дают полной возможности выявить действительное состояние механических свойств сталей и не позволяют правильно судить об их прочности и пластичности. В связи с этим, выбирая допускаемые напряжения при высоких температурах, следует учитывать всестороннее изменение комплекса механических свойств: предела прочности, предела текучести, длительной прочности и склонности сталей к ползучести, релаксации. При определении работоспособности стали в данных условиях необходимо учитывать также и ряд таких факторов, как склонность к тепловой хрупкости, графитизации, старению.

Ползучестью, как известно, называют способность стали при высокой температуре медленно пластически деформироваться под действием постоянной нагрузки. Испытания на ползучесть проводят в специальных электропечах по заданной программе, определяющей деформацию образца.

Длительность испытаний обычно составляет 2000-3000 ч, но, при необходимости, может быть увеличена. По результатам испытаний вычисляют относительную скорость ползучести  $V_n$  по формуле:

$$v_n = \frac{\Delta l}{l \cdot \tau},$$

где  $\Delta l$  – абсолютная деформация образца;

$l$  – расчетная длина образца;

$\tau$  – время испытаний.

Пределом относительной скорости ползучести (условным) называют напряжение, которое вызывает абсолютную деформацию образца 1% ( $\Delta l=0,01$ ) за определенное время  $\tau$ . Величина предела ползучести определится относительной скоростью ползучести:

$$v_n = \frac{0,01l}{10000} = 10^{-6}$$

$$\text{или } v_n = \frac{0,01l}{100000} = 10^{-7} \text{ мм/мм}\cdot\text{ч.}$$

Изложенные факторы усиливают разрушительные процессы коррозионного воздействия и должны быть учтены при выборе материалов при проектировании и изготовлении оборудования.

#### Выводы.

Создаваемое оборудование должно решать задачу оптимального выбора конструкционных коррозионноустойчивых материалов, для химически агрессивных сред, технологичных материалов, обеспечивающих в полном объеме, высокую надежность, гарантированную безопасность и реальную экономичность.

При этом конструктору необходимо знать физико-химические свойства материалов, влияние на

работу сосудов и аппаратов внешних и внутренних условий: температуры, давления, коррозионное и эрозионное воздействие среды, механические свойства материалов (предел прочности, линейного

расширении, теплопроводность, свариваемость, обрабатываемость давлением и др.), что позволит выбрать материалы пригодными к работе.

#### Список литературы:

1. Eight items affect materials choices. P.Dillon – Te oiland Gas Gjbrnal. 1977 p.
2. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ Л.Л., ДАНИЛОВ Ю.Б., КАЧАНОВ В.А., ПЕРЦЕВ Л.П., ШЕПЕЛЬ Т.Э. Конструкционные металлические материалы в химическом и нефтегазовом машиностроении. Уч. пособие. Х. : Підручник, НТУ «ХПІ». 2012г. – 212 с.
3. Белинский А.Л., Кристал М.М., Кутепов С.М., Логвинов В.И., Шапиро М.Б. Система выбора сталей и сплавов для химического оборудования-Химическое и нефтяное машиностроение 1984-№8- С 24-29.

2. Tovazhnyans'kyu L. L., Danilov Y.B., Kahanov B.A., Perzev L.P., Shepel T.E., Kontrukzionnye mttaliheskie material b himiheskom I nefegazobom mahinostroenii Structural metal materials in chemical and mechanical engineering neftegazovom (Structural metal materials in chemical and mechanical engineering)- Textbook.: Pidryhnik NTU HPI. 2012. – 212 p.
3. Belinsky A.L., Kristal M.M., Kytateladze C.M., Logbinov V.I., Napiro M.B. Sistema bubora staley i splavov dla himiheskogo oborydovania (The choice of steels and alloys for chemical equipment)- Chemical and petroleum engineering 1984p. – No 8. – 24–29 p.

#### Bibliography (transliterated):

1. Eight items affect materials choices. P.Dillon – Te oiland Gas Gjbrnal. 1977. – 202 p.

Поступила (received) 23.10.2016

#### Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

**Вимоги до вибору конструкційних матеріалів при проектуванні та виготовленні обладнання для хімічної промисловості / Ю.Б. Данилов, Л.П. Перцев // Вісник НТУ «ХПІ». Х.: НТУ «ХПІ», 2016. № 29 (1209). – С. 9 – 13. – Бібліогр. 3 назв. – ISSN 2220-4784.**

**Требования к выбору конструкционных материалов при проектировании и изготовлении оборудования для химической промышленности / Ю.Б. Данилов, Л.П. Перцев // Вісник НТУ «ХПІ». Х.: НТУ «ХПІ», 2016. – № 29 (1209). – С. 9–13. – Библиогр. 3 назв. – ISSN 2220-4784.**

**The requirements for selecting structural materials in the design and manufacture of equipment for chemical industry / Y.B. Danilov, L.P. Perzev // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Innovation researches in students' scientific work. – Kharkiv : NTU «KhPI», 2016. – № 29 (1209). – P. 9–13. – Bibliogr.: 3 titles. – ISSN 2220-4784.**

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Данилов Юрій Борисович** – доктор технічних наук, професор кафедри інтегрованих технологій, процесів та апаратів, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», тел.: +380503432705; e-mail: [danylovyb@mail.ru](mailto:danylovyb@mail.ru)

**Danylov Yuri Borisovich** – doctor of technical sciences, Professor, Department of Integrated technologies, processes and apparatus National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», tel. : +380503432705; e-mail: [danylovyb@mail.ru](mailto:danylovyb@mail.ru)

**Данилов Юрий Борисович** – доктор технических наук, профессор кафедры интегрированных технологий, процессов и аппаратов, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», тел.: +380503432705; e-mail: [danylovyb@mail.ru](mailto:danylovyb@mail.ru)

**Перцев Леонід Петрович** – доктор технічних наук, професор кафедри інтегрованих технологій, процесів та апаратів, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», тел.: +380503432705; e-mail: [danylovyb@mail.ru](mailto:danylovyb@mail.ru)

**Perzev Leonid Petrovich** – doctor of technical sciences, Professor, Department of Integrated technologies, processes and apparatus National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», tel. : +380503432705; e-mail: [danylovyb@mail.ru](mailto:danylovyb@mail.ru)

**Перцев Леонид Петрович** – доктор технических наук, профессор кафедры интегрированных технологий, процессов и аппаратов, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», тел.: +380503432705; e-mail: [danylovyb@mail.ru](mailto:danylovyb@mail.ru)