

УДК 539.4:66.026.2-987

Комаишко С. Г.
Моисей М. В.
Дмитриев В. Я.
Смирнова А. Г.
Данилов Н. А.

АВТОФРЕТИРОВАНИЕ КАК СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ПРОЧНОСТИ ТРУБ, РАБОТАЮЩИХ ПРИ ДАВЛЕНИЯХ ДО 250 МПа В УСЛОВИЯХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПЕРЕПАДОВ

В данной статье обобщен многолетний опыт прочностных расчетов элементов установок производства полиэтилена высокого давления (ПЭВД) (труб и колен). Поскольку трубы и колена являются элементами теплообменных аппаратов, эксплуатационными параметрами, помимо высокого давления, являются и температурные перепады. Так, в установках реакторов [1], перепад температур составляет 160/220 °С.

Цель настоящей работы состояла в том, чтобы определить оптимальную величину давления автофретирования труб, для возможности их эксплуатации при давлениях свыше 200 МПа, без увеличения материалоемкости. Автофретированием достигается создание благоприятных остаточных сжимающих напряжений в стенке трубы или колена со стороны отверстия путем нагружения трубы давлением, при котором в части стенки, начиная с внутренней поверхности, появляются пластические деформации [2].

Актуальность производства труб для установок синтеза полиэтилена высокого давления, была обусловлена необходимостью ремонта импортных, который заключался в растачивании внутреннего диаметра для удаления дефектов и шлифовании. При таком ремонте, естественно, уменьшалась толщина стенки, что являлось недопустимым по стандартам Российской Федерации.

Операция автоскрепления нашла широкое применение в оборонной промышленности с начала модернизации танков и стволов пушек в послевоенные годы [3].

Распределение тангенциальных напряжений в сечении стенки трубы приведено на (рис. 1).

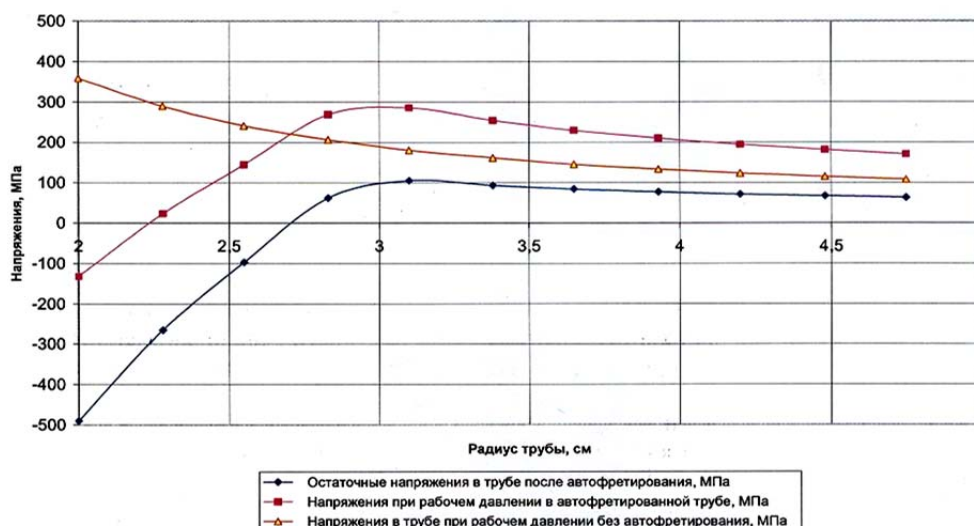


Рис. 1. Распределение тангенциальных напряжений в трубе при автофретировании

Поскольку в сечении создаются не только тангенциальные напряжения, методом конечных элементов были рассчитаны эквивалентные напряжения, возникающие в трубе при воздействии рабочего давления (рис. 2).

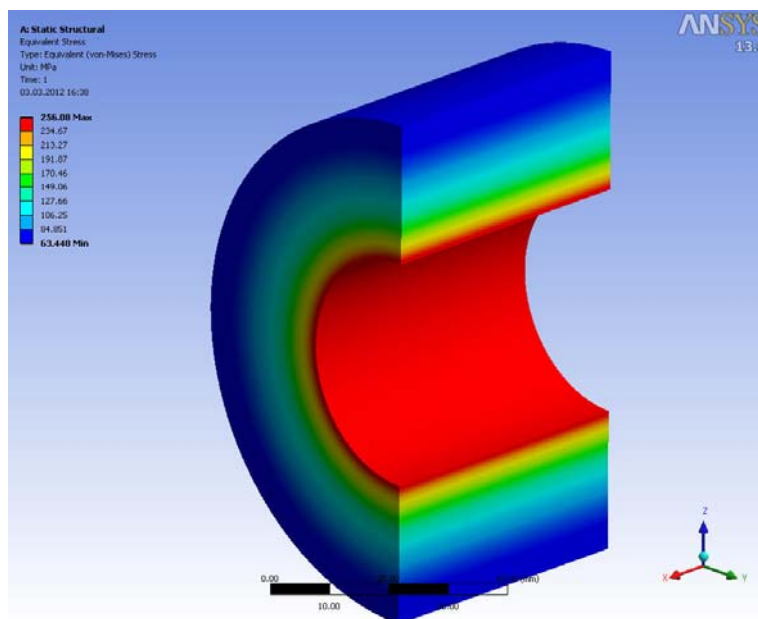


Рис. 2. Распределение эквивалентных напряжений по толщине стенки трубы под действием рабочего давления 250 МПа

Как следует из результатов расчета, максимальный уровень эквивалентных напряжений наблюдается в зоне внутреннего диаметра и составляет 256 МПа, что превышает уровень допустимых напряжений.

Как упоминалось ранее, при автофретировании трубы давлением $P_a = 600$ МПа, на внутреннем диаметре (рис. 3) создаются сжимающие напряжения.

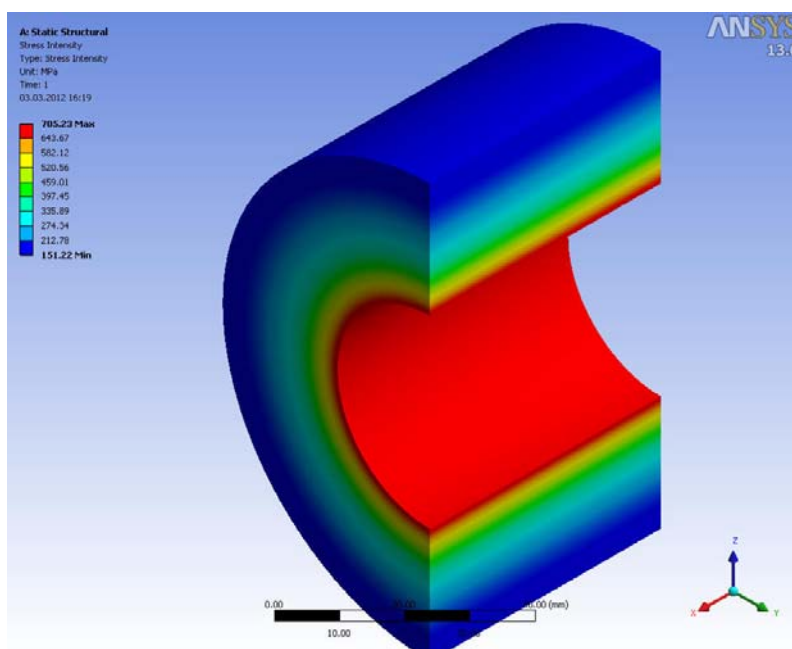


Рис. 3. Интенсивность сжимающих напряжений в трубе при операции автофретирования давлением 600 МПа составляет 705 МПа

После снятия нагрузки интенсивность остаточных сжимающих напряжений невысокая (рис. 4). Но в момент автофретирования происходит пластическая деформация в зоне, составляющей 15–20 % от толщины стенки. После операции автофретирования и снятия нагрузки интенсивность остаточных сжимающих напряжений составляет всего 55 МПа.

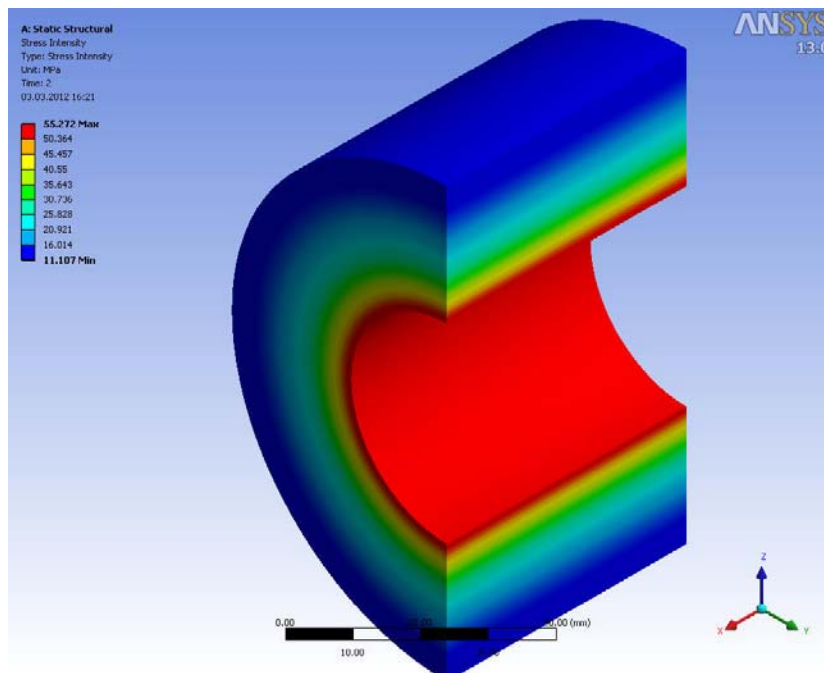


Рис. 4. Интенсивность остаточных сжимающих напряжений в разгруженном состоянии

Методом конечных элементов были рассчитаны эквивалентные напряжения при рабочем давлении в автофретированной трубе (рис. 5).

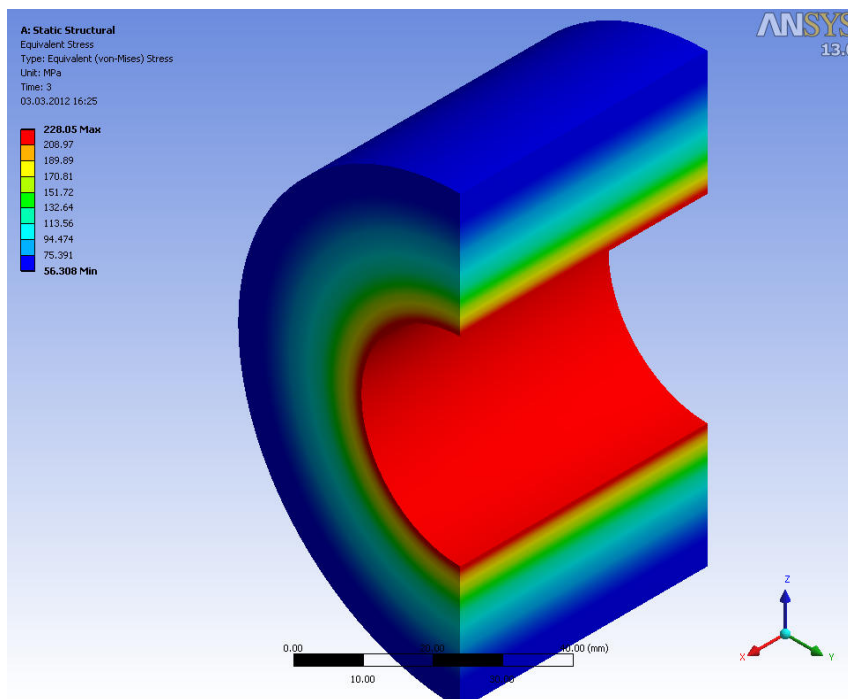


Рис. 5. Автофретированная труба под действием рабочего давления (250 МПа). Максимальные напряжения в изделии составляют 228 МПа

Сравнение уровня напряжений под воздействием рабочего давления в трубе, не подвергавшейся автофретированию (рис. 2) и автофретированной (рис. 5), показывает, что после автофретирования напряжения в трубе составили 228 МПа. Уровень напряжений в трубе без автофретирования превысил допустимый и составил 250 МПа.

Схема и внешний вид установки, на которой проводится операция автофретирования, приведены на рис. 6–7.

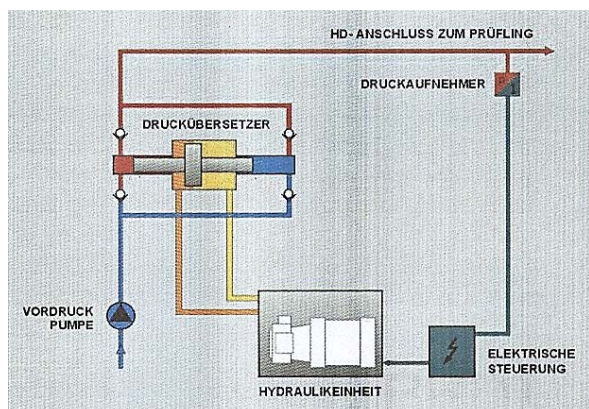


Рис. 6. Принципиальная схема установки для нагружения давлением до 10000 атм.



Рис. 7. Внешний вид установки для нагружения давлением до 10000 атм.

Важной характеристикой процесса синтеза полиэтилена является высокое давление. В холодильниках оно достигает 250 МПа.

До 1992 года на всех нефтехимических предприятиях России и СНГ при таких давлениях применялись только импортные трубы. Характеристики импортных и отечественных труб, разработанных для импортозамещения, приведены в табл. 1. В качестве отечественного аналога стали 30CrNiMo8 разработана и применяется сталь 30X2H2MФА-Ш, а аналогом стали Cr13 является сталь 12X13-Ш.

В настоящее время разработаны и применяются ТУ на заготовки и трубы из отечественных марок сталей.

Таблица 1

Механические свойства труб, применяемых в установках ПЭВД

Марка стали	$T_{исп}$	$\sigma_{тц}$	$\sigma_{0.2}$	σ_b	δ	ψ	KCV	KCU	K_{IC}
	°C	МПа			%		Дж/см ²		Кгс/мм ^{3/2}
30CrNiMo8 «Маннесманн»	20	880	970	1080	4,0	5,0	87	96	431
	50								
30X2H2MФА-Ш	20	870	910	1000	7,4	4,0	85	98	440
	50								
38ХН3МФА	20	1100	1150	1230	1,4	0,0	-	-	365
	50								
20X3МВФ-Ш	20	825	930	1020	2,8	6,0	24	-	237
	50								
Cr 13 Англия	20	545	615	745	4,8	5,0	87	104	400
	50								
12X13-Ш	20	560	650	750	9,0	2,0	100	300	415
	50								

3D-модели трубы и колена высокого давления, работающие при давлении свыше 250 МПа, приведены на рис. 8–9.

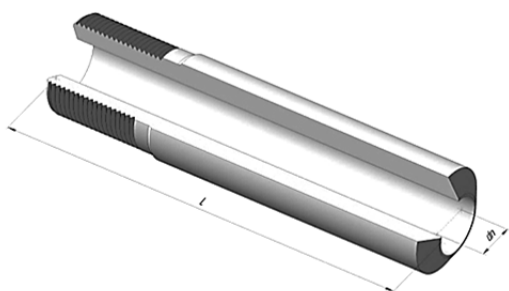


Рис. 8. Объемная модель трубы высокого давления

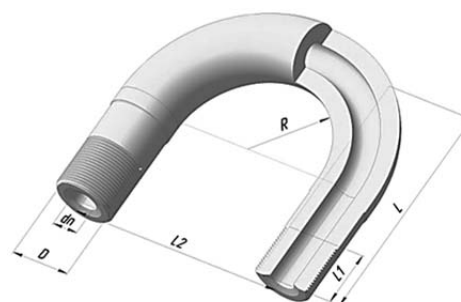


Рис. 9. Объемная модель колена высокого давления

Соединение элементов трубопроводов высокого давления осуществляется с помощью резьбовых соединений, а уплотнение за счет линз.

Следует отметить, что в зависимости от того – в реакторе либо в теплообменнике установлены трубы, изменяется перепад температур, возникающий в процессе эксплуатации труб. Именно совместное воздействие высокого давления и температурных перепадов является критическим с точки зрения расчетов на прочность.

Проверка выполнения условия прочности трубы ($\varnothing_{\text{нар.}}$ 95 мм, толщина стенки 27,5 мм из стали 30X2Н2МФА-Ш) или колена, изготовленного из этой трубы, в условиях воздействия рабочего давления и перепадов температур, показала, что по нормативам Российской Федерации [1–2], их прочность не обеспечивается.

Допускаемое давление в трубе рассчитывается из следующего соотношения:

$$p \leq [p] = \varphi \times [\sigma]^T \times \ln[(D - 2c_2 - c_4) / (d + 2c_1 + 2c_3)], \quad (1)$$

где $[p]$ – допускаемое давление;

$\varphi = 1$ – коэффициент прочности сварного шва (сварные швы отсутствуют);

$[\sigma]^T$ – допустимое напряжение материала при температуре 340 °С;

c_1 и c_2 – прибавки на коррозионный износ внутренней и наружной поверхности за расчетный срок службы 20 лет;

c_3 и c_4 – технологические прибавки, компенсирующие допуски на толщину стенки и наружный диаметр.

Исходя из уровня коэффициента запаса прочности $n_e = 2,6$ [1], получаем:

$$\text{– при } n_e = 2,6 \text{ [1]} \quad p = 250 \text{ МПа} > [p] = 201 \text{ МПа};$$

– при значении коэффициента запаса $n_e = 2,2$ [2] получаем:

$$p = 250 \text{ МПа} > [p] = 238 \text{ МПа}. \quad (2)$$

Поскольку рассчитанные допускаемые давления в трубе ниже давлений, возникающих при эксплуатации, для обеспечения прочности без повышения толщины стенки трубы производится автофретирование.

Для расчета давления автофретирования применяется установленное соотношение:

$$1,1 \times p_{\text{пробное}} \leq P_{\text{авт}} \leq \chi^{20} \times \sigma_{\text{в}}^{20} \times \ln(\beta_p) / 1,5, \quad (3)$$

где χ^{20} – принимают равным 1 для сталей с отношением $\sigma_{\text{т}}^T / \sigma_{\text{в}}^T = 0,92 \geq 0,7$.

Пробное давление назначается в зависимости от условий эксплуатации и, как правило, составляет 1,5 $[p]$, которое рассчитано ранее в (2).

Получаем:

$$368 \text{ МПа} \leq p_a \leq 548 \text{ МПа}. \quad (4)$$

Таким образом, для повышения прочности трубы, работающей при давлении 250 МПа, необходимо при автофретировании создать давление от 368 до 548 МПа.

Воздействия перепадов температур оценивались на самом контрастном режиме:

– температура рабочая номинальная в трубе + 160 °С, в рубашке + 220 °С, температурный перепад 60 °С.

Сравнительный анализ по уровню эквивалентных напряжений, возникающих в процессе эксплуатации под действием рабочего давления и перепада температур, проводили на трубах, подвергнутых автофретированию и без автофретирования.

Исходя из указанного выше температурного перепада, анализировалось напряженно-деформированное состояние стенки трубы или колена без автофретирования и при давлениях автофретирования от 550 МПа до 750 МПа при рабочем давлении 250 МПа.

Результаты расчетов приведены на рис. 10.

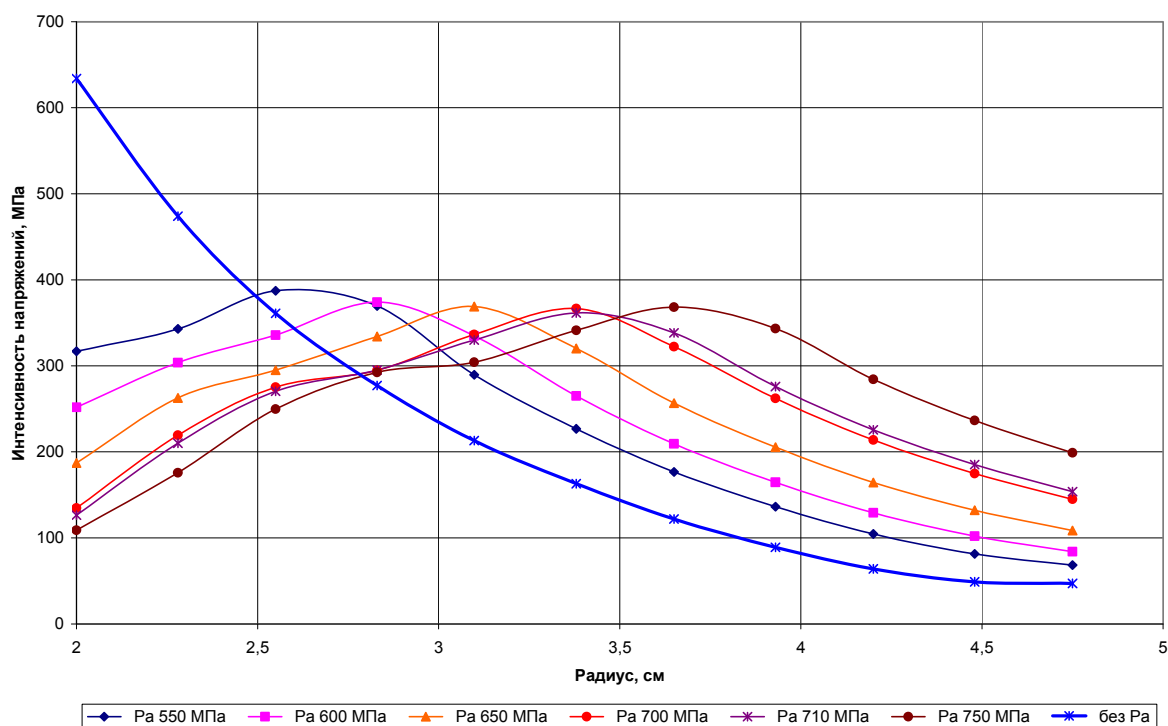


Рис. 10. Распределение интенсивности напряжений по толщине стенки трубы при перепаде температур T160/220 и Pраб-250 МПа при различных давлениях автофретирования

При перепаде температур 160/220 °С достигается минимальное значение интенсивности напряжений 361 МПа по всей толщине стенки трубы или колена после автофретирования с $P_a = 710$ МПа, при отсутствии автофретирования значение интенсивности напряжений составляет со стороны внутреннего диаметра более 600 МПа, что является недопустимым уровнем. Автофретирование снижает уровень эквивалентных напряжений на внутренней стенке и способствует равномерному распределению напряжений в слое толщиной до 4,5 мм.

Коэффициент запаса прочности, определяемый как отношение предела текучести материала при температуре 340 °С равному 650 МПа к максимальному значению интенсивности напряжений 375 МПа составляет 1,73. Для дальнейших расчетов, выполняемых в соответствии с [1], принимается значение давления автофретирования равное 600 МПа. При выборе величины давления автофретирования проводится проверка выполнения следующих условий:

1. Интенсивность деформаций на внутренней поверхности трубы колена при автофретировании должна быть меньше допускаемой величины:

$$(\varepsilon_{i,r})_a \leq \ln[1 / (1 - \psi^{20})] / 20, \quad (5)$$

где ψ^{20} – относительное сужение материала при температуре 20 °С, для стали 30Х2Н2МФА-Ш равно 50 %, тогда $(\varepsilon_{i,r})_a \leq 0,0346$.

Полученная расчетом интенсивность деформации по толщине стенки трубы или колена при автофретировании представлена на рис. 10. Значение интенсивности деформации на внутренней поверхности трубы или колена при автофретировании равно 0,008. Таким образом, условие (5) выполнено.

2. После сброса давления автофретирования на внутренней поверхности трубы или колена не должно возникнуть вторичных пластических деформаций:

$$p_a \leq 1,15 \cdot \sigma_T^{20} \times (\beta_p^2 - 1) / \beta_p^2 = 1,15 \times 750 \times (2,375^2 - 1) / 2,375^2 = 710 \text{ МПа}, \quad (6)$$

следовательно, условие выполнено.

3. При автофретировании пластическая зона не должна превышать 50 % толщины стенки трубы колена:

$$(\beta_n - 1) / (\beta_p - 1) \leq 0,5.$$

Глубина пластической зоны в соответствии с результатами расчета, представленными на рис. 10, составляет 1,1 см (на радиусе 3,1 см и $\beta_n = 1,55$) или 40 % толщины стенки, следовательно, условие выполняется. Анализ напряженного состояния трубы или колена реактора при совместном воздействии давления и температуры позволил назначить оптимальное значение давления автофретирования с позиций получения минимальных значений интенсивности напряжений при всех температурных режимах эксплуатации.

ВЫВОДЫ

Результаты применения автофретирования для труб и колен, применяемых на установках, работающих при давлениях свыше 250 МПа, позволили использовать более тонкостенные трубы высокого давления, в сравнении с регламентированными Российскими нормативами. Следовательно, значительно снижена материалоемкость деталей трубопроводов: труб и колен. Очевидно, что для деталей трубопроводов, работающих при более низких давлениях, применение автофретирования позволит существенно снизить их материалоемкость и увеличит их надежность.

Предложенный способ упрочнения за счет создания сжимающих напряжений на рабочих поверхностях является эффективным для ответственных деталей, эксплуатируемых при температурных перепадах и деформациях в различных сферах металлургии и машиностроения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Сосуды и трубопроводы высокого давления : справочник / Кузнецов А. М., Ливиц В. И., Хисматуллин Е. Р. и др. – Изд. 2-е, доп. – Иркутск : Иркутская областная типография № 1, 1999. – 600 с.*
2. *СТО 00220227-026-2009. Стандарт организации. Трубы и детали трубопроводов на давление свыше 100 до 320 МПа. Нормы и методы расчета на прочность. ОАО «ИркутскНИИхиммаш», ОАО «Дефорт».*
3. *Малинин Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести / Н. Н. Малинин – М. : Машиностроение, 1975. – 399 с.*

Комаишко С. Г. – ген. директор ОАО «Дефорт»;

Моисей М. В. – гл. конструктор ОАО «Дефорт»;

Дмитриев В. Я. – канд. техн. наук, нач. отдела ОАО «Дефорт»;

Смирнова А. Г. – канд. техн. наук, зам. ген. директора ОАО «Дефорт»;

Данилов Н. А. – вед. специалист отдела ОАО «Дефорт».

ОАО «Дефорт», г. Санкт Петербург, Россия.

E-mail: defort@list.ru

Статья поступила в редакцию 13.02.2012 г.