

Почему криогенщики не применяют литые корпуса криогенной арматуры или сопоставление сталей в литом и деформированном состоянии

Ю.С. Кривцов, к.т.н., Международная академия холода,
С.Л. Горобченко, к.т.н., ЗАО «МЕТСО АВТОМАТИЗАЦИЯ»

В предыдущем номере¹ мы обсуждали перспективы применения литых сталей для криогенной арматуры. Проблема в том, что у производителей имеется предубеждение против литья корпусов, поскольку множество литейных дефектов не позволяет использовать литые корпуса для изделий ответственного назначения, которыми является криогенная арматура. Так, за время существования крупных заводов криогенного машиностроения (ОАО «Криогенмаш», ОАО «Кислородмаш») ими поставлены сотни крупных и средних криогенных установок на предприятия бывшего Советского Союза и других стран. Практически все они укомплектованы криогенной арматурой, выполненной в варианте штампованной, штампованной или изготовленной из трубных заготовок, *рис. 1*.



Рис. 1. Криогенный клапан с вакуумной изоляцией

¹ См. Арматуростроение №5-2010, с. 62.

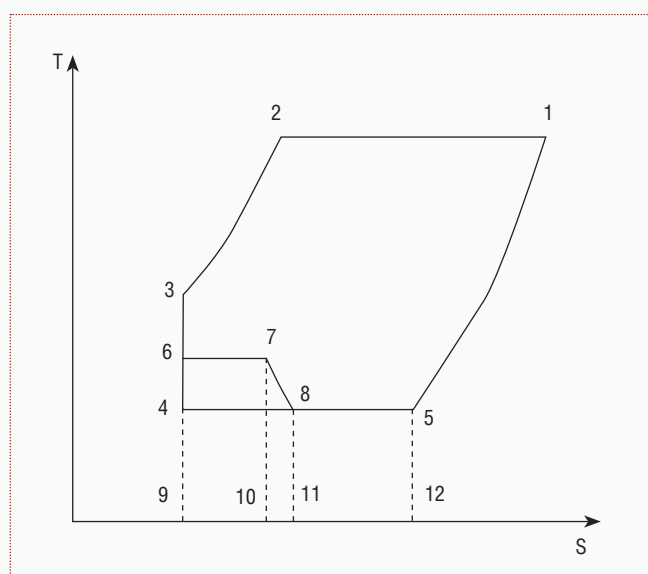


Рис. 2. Потери на гидравлическое сопротивление арматуры в криогенном цикле

В тоже время, давно известно, что для таких критических сред, какими являются легко вскипающие криогенные жидкости, наличие значительных гидравлических сопротивлений, характерных для штампованных корпусов, приводит не только к ухудшению характеристик регулирования, но и к значительному увеличению энергопотребления насосами. В целом значительно ухудшаются условия проведения криогенного цикла, см. *рис. 2*.

Только ради изготовления корпусов такой арматуры приходится организовывать несколько цехов (раскройный, штамповочный, мехобработки, сварочный и т.д.), что несопоставимо увеличивает длительность производственного цикла по сравнению с изготовлением их из литых. Тем не менее, литые корпуса не используются. Почему? Ответ лежит в разнице свойств литых и деформированных сталей.

При помощиковки или прокатки можно устранить практически все грубые литейные дефекты; разбить дендритную структуру и сетку включений по границам дендритов, и др. Степень качества литых сталей можно косвенно оценить по близости механических свойств, особенно пластичности и вязкости в литом и деформированном состоянии.

На *рис. 3* представлены сводные графики прочности (*a*), пластичности (*b*), ударной вязкости (*c*), при температурах

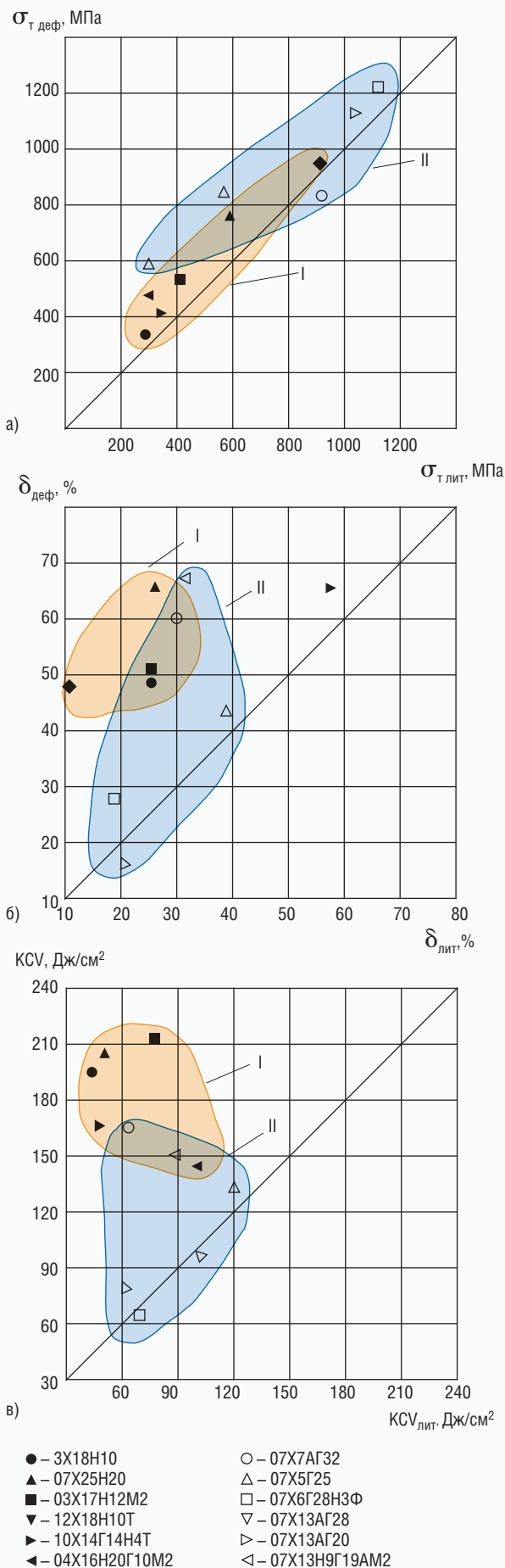


Рис. 3. а) предел текучести, ($\sigma_{0,2}$); б) относительное удлинение (δ); в) ударная вязкость КСV хромоникелевых (I) и хромомарганцевых сталей (II) в литом и деформированном состоянии при криогенных температурах

77 и 20К наиболее часто применяемых хромоникелевых и хромомарганцевых сталей в литом и деформированном состоянии. Главные показатели при криогенных температурах – а это пластичность и ударная вязкость – литых сталей 07Х5Г25, 07Х6Г28НФ, 07Х13АГ20, 07Х13АГ28 практически не отличаются от значений деформированных.

Таким образом, несмотря на наличие грубой литой структуры, хромомарганцевые стали имеют значительно более близкую к деформированным низкотемпературную пластичность, чем хромоникелевые. Попробуем разобраться с причинами. Для этого проанализируем, как разрушаются литые стали при криогенных температурах.

Характер разрушения зависит от внутренних и внешних факторов. Если внешние факторы для сталей в литом и деформированном состоянии одинаковы (температура, скорость нагружения, масштабный фактор и др.), то внутренние факторы (размер зерна, наличие дендритной структуры или волокон, расположение неметаллических включений и др.) резко различаются.

Большинство специалистов считают, что понижение эксплуатационных свойств, надежности и связанной с ней пластичности определяется главным образом литой структурой. Литая структура отличается высокой степенью дендритной и химической неоднородности. Наибольшее же отличие литых сталей по сравнению с деформированными наблюдается в расположении неметаллических включений.

Особое значение для литых криогенных сталей имеет состояние границ зерен, поскольку зернограничный излом является, как правило, наиболее вероятным видом хрупкого разрушения аустенитных хромоникелевых сталей и связан с охрупчиванием примесей и неметаллических включений. Но в тоже время видно, что эти особенности структуры мало влияют на свойства правильно подобранного состава хромомарганцевой стали. Разберем каждый из влияющих факторов отдельно.

В большинстве случаев при хрупком разрушении литых аустенитных хромоникелевых сталей наблюдают дендритный или древовидный излом. Разрушение происходит вдоль крупных дендритов. Особенно вредной структурой является наличие дельта-феррита в аустените. Фасетки скола в изломе образуются при прохождении магистральной трещины по ферриту. Это обуславливает снижение пластичности и появление в изломе хрупкой составляющей, *рис. 4*. При его отсутствии распространение трещины происходит вдоль крупных дендритов. Этому соответствует низкая ударная вязкость в литом состоянии. Пластические свойства этих сталей обычно повышаются в 2-4 раза после горячей прокатки. Но для хромомарганцевых сталей эти зависимости не действуют. Так, для стали с 25% Mn даже при температуре до 4К сохраняется вязкий характер разрушения, тогда как в изломе хромоникелевой стали всегда обнаруживается дендритная структура.

Без анализа неметаллических включений и химической неоднородности, сопровождающих дендритную кристаллизацию высоколегированных сталей, невозможно установить роль самой грубой дендритной структуры в разрушении сталей. Так, устранить вредное влия-

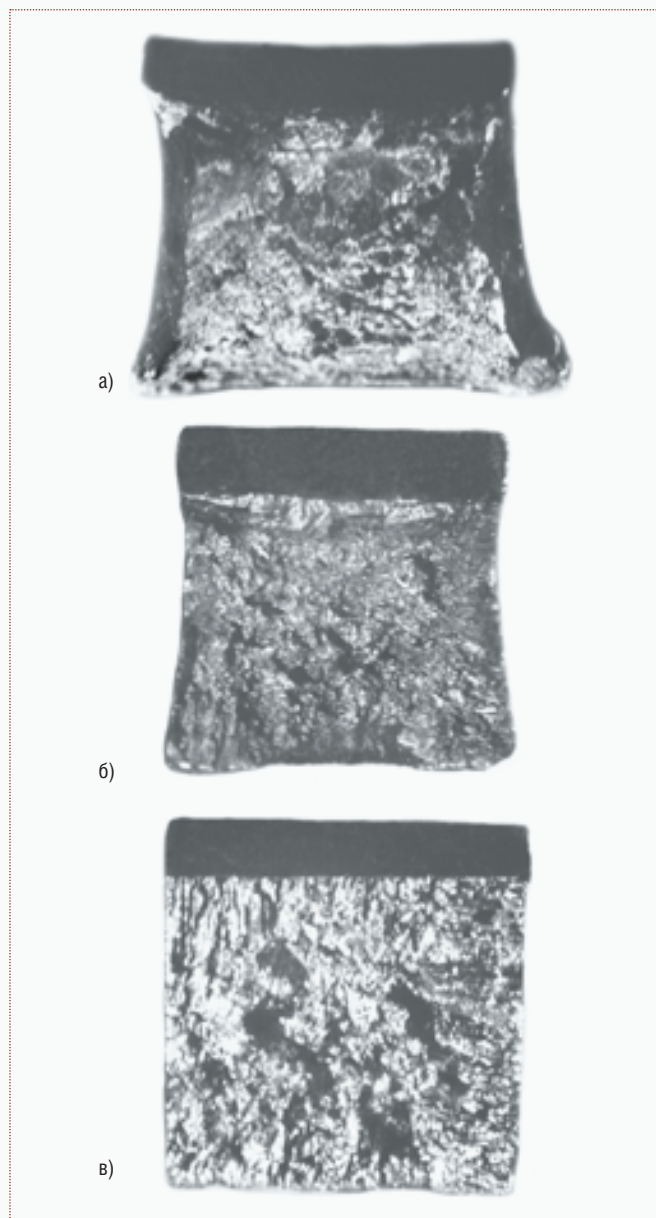


Рис. 4. Излом ударных образцов литых хромоникелевых сталей при комнатной (а), и криогенных температурах (б) и (в)

ние включений по границам дендритов можно горячей прокаткой, а ликвацию – гомогенизацией. К тому же дендритная структура сама по себе и неплоха. Например, высокомарганцевые стали с дендритной структурой имеют высокую вязкость и вязкий характер разрушения при криогенных температурах. Т.е., формируется литой композит с перемежающимися пластичными и прочными участками. Такая структура, как мы знаем, наиболее эффективно противостоит росту трещины. К тому же часто обнаруживается отсутствие связи между свойствами и наличием грубой литой или равноосной структурой, а механические свойства сталей с различными дендритными структурами бывают близки. Поэтому представления о решающей роли дендритной структуры в падении механических свойств не подтверждаются.

Многие специалисты относят основное падение низкотемпературной вязкости к особенностям расположения неметаллических включений в литой структуре. Их отрицательное влияние объясняют ростом микронапряжений из-за разных коэффициентов термического расширения, потерей когезивной прочности по межфазной границе, охрупчиванием включений, локализацией деформации вблизи включений.

Однако, у неметаллических включений есть и положительная роль. Она заключается в снижении стесненности пластической деформации и переводе трещины в вязкое течение, повышении прочности без потери пластичности. По форме наибольшее снижение пластичности происходит в сталях с пленочными включениями, наименьшее с глобулярными, внутризеренными. При этом к пленообразованию в виде лепестков и плен склонны сульфиды и сульфидные эвтектики по границам зерен. В основном к пленообразованию склонны хромоникелевые стали. Для хромомарганцевых сталей это не характерно.

Эксплуатационная надежность литой стали по сравнению с деформированной в большей степени зависит

Таблица 1. Характеристика брака корпусов арматуры при литье в оболочковые формы и землю

№	Сталь	Количество дефектов, %	Вид дефекта
Литье в оболочковые формы			
1	12X18H10TЛ	7,5	Газовые раковины
		8,5	Неисправимый брак – сквозные раковины
			Исправимый брак: – ситовидная пористость, вскрываемая при механической обработке, чрезвычайно значительна; – плены – течь в корпус, вскрывается в конце при испытании внутренним давлением, брак приходится исправлять по многу раз
2	16X18H12Г4ТЮЛ	15	Дефекты аналогично ст 12X18H10TЛ, 15% течет сразу при испытании
3	07X20H25M3Д2ТЛ	15	– // –
4	07X13 Г19		Недоливы*, шлаковые включения
Литье в землю			
1	12X18H10TЛ	9	В основном, газовые раковины, шлаковые включения
2	16X18H12Г4ТЮЛ	15	– // –
3	07X20H25M3Д2ТЛ	15	– // –

* недоливы связаны, по всей видимости, с неотработанностью режима литья

Таблица 2. Результаты испытаний корпусов внутренним давлением

№	Материал корпуса. Характерные марки сталей – представители	T _{исп}	Давление в момент разрушения	Увеличение периметра клапана	Характер разрушения
		К	МПа		
1	07X8Г28	293	410*	13	Нет
		77	410*	4	Нет
2	07X13АГ20	293	150	8	Вязкий
		77	280	3	Вязкий
3	07X13Г29АНФЛ	293	360	10	Вязкий
		77	410	3	Вязкий
4	12X18Н10ТЛ (литой вариант)	293	80	5	Вязко-хрупкий
		77	130	0	Хрупкий
5	12X18Н10Т (из деформированной стали)	293	220	16	Вязкий
		77	400	10	Вязкий

* дальнейшее повышение давления ограничивалось возможностями водяного и криогенного насосов. Разрушения корпуса не происходило

от технологии производства. Технологически высокая надежность достигается высоким качеством стали на этапе выплавки, разливки и кристаллизации в форме и технологичностью конструкции. Примеры технологического брака в производстве сталей, используемых для криогенной арматуры, приведены в *таблице 1*.

Наиболее важным свойством литой стали, обеспечивающим герметичность, является отсутствие спаев, плен, заворотов на поверхности, а также рассеянной пористости. Между тем плены являются основным дефектом нержавеющей хромоникелевых сталей. В высокомарганцевых сталях пленообразования не отмечается. Снижение пленообразования позволяет одновременно увеличить пластичность и ударную вязкость.

Наиболее опасным дефектом структуры литой стали для криогенной арматуры является пористость. Устранение пористости, связанной с газонасыщенностью и пленообразованием стали, снижение в стали пленообразующих элементов позволяет снизить брак по газовой негерметичности отливок арматуры (сталь 12X18Н10ТЛ) с 11 до 0,7%. В частности, добиваться качественного изготовления отливок из сталей 304L (Cr18Ni10), 310S (Cr25Ni20), 316L (Cr17Ni12,Mo2) компании Metso Automation удается за счет значительного ужесточения требований к литью. К тому же используются только компании – производители арматурного литья с наличием соответствующей производственной и испытательно-контрольной базы. Основной способ устранения усадочных микропор при этом остается технологическим: повышение качества расплава, увеличение скорости охлаждения или повышение растворимости газов в жидкой стали за счет роста температуры разливки.

Однако физически по диаграммам состояния из-за малой окисляемости никеля в Cr-Ni стали повысить растворимость газов невозможно. Возможность получения беспористой структуры в Cr-Mn стали очевидна, поскольку марганец отлично окисляет и обеспечивает

повышенную растворимость газов в матрице. В этом кроется еще одно преимущество хромомарганцевых сталей.

При разливке наиболее важными оказываются температура заливки и скорость охлаждения. Температура заливки определяет, в основном, литейные свойства сталей и через них влияет на механические свойства. Снижение температуры заливки ниже 1500° С для хромоникелевых сталей приводит к пленообразованию и потере жидкотекучести, тогда как хромомарганцевые стали можно лить при более низких температурах.

Наибольшее влияние на снижение технологического брака отливок оказывает конечное раскисление. В тонкостенных отливках арматуры роль раскисления выше из-за стесненности питания растущих кристаллов. Для литых сталей криогенной арматуры наилучшим будет комплексное раскисление и модифицирование при условии оптимальной температуры разливки. В этом случае достигается однородность структуры, измельчение дендритов, равномерное распределение глобулярных включений и чистота границ зерен по пленам.

Опытно-промышленные испытания литых корпусов показали, что многие из них превысили результаты испытаний из деформированной стали или не разрушались совсем, *таблица 2*.

Заключение

Несмотря на то, что сейчас, в основном, используются только штамповарные конструкции арматуры, и резко ужесточаются требования к контролю за качеством отливок, приводящих в целом к росту издержек и стоимости криогенной арматуры для конечных потребителей, новый толчок к применению литых корпусов ответственного назначения может быть дан, если использовать новые Cr-Mn стали. Они по своей структуре, служебным и технологическим свойствам в полной мере соответствуют требованиям, предъявляемым к корпусам криогенной арматуры.