

тивность внедрения для одного предприятия составляет в среднем 15–20 тыс. руб. Дальнейшее развитие работ по автоматизации проектирования раскроя листового материала ведется как в направлении совершенствования автоматизированного проектирования, так и в направлении комплексного объединения компонентов в подсистему РАСКРОЙ, что позволит значительно повысить эффективность внедрения этих работ на предприятиях отрасли.

УДК 621.983:621.787

И.Г.Добровольский, канд.техн.наук
(БПИ), В.С.Шляховой, инженер
(НИИтехноприбор, г. Смоленск)

МЕТОД ИСПЫТАНИЯ СИЛЬФОННЫХ ТРУБОК-ЗАГОТОВОК

Сильфоны в настоящее время находят широкое применение в узлах и приборах точной механики. Материал исходных сильфонных трубок-заготовок должен удовлетворять ряду требований, которые обусловлены технологическими и эксплуатационными факторами. С целью получения информативной оценки механических свойств материала, характеризующих его способность к упрочнению и предельные пластические свойства, проводятся испытания сильфонных трубок-заготовок. Поскольку механические свойства материала, оцененные в ходе испытания образцов в условиях нагружения, отличающихся от реальных, не учитывают полностью процессов, происходящих в металле при его деформировании [1], постольку используемый метод испытаний должен по возможности соответствовать условиям деформирования, имеющим место при изготовлении сильфонов.

Напряженное состояние в стенке трубки-заготовки при формообразовании сильфонов является плоским, причем одна из компонент напряжения, действующая в окружном направлении, всегда растягивающая и по своей величине является преобладающей [2]. Вторая компонента напряжений, действующая в осевом направлении трубки-заготовки, может быть как растягивающей, так и сжимающей в зависимости от соотношения внутреннего давления жидкости и осевой сжимающей силы. Соотношение нагрузок на различных стадиях формообразования сильфона может изменяться в достаточно широких интервалах. Тем не менее существует общая особенность напряженно-деформированного состояния, заключающаяся в том, что основная активная де-

формация происходит в окружном направлении трубки-заготовки под действием внутреннего гидростатического давления.

Методы механических испытаний труб, внесенные в ГОСТ [3], не предусматривают возможности определения механических свойств материала в условиях нагружения, близких к рассмотренным. Из известных методов, наиболее полно отвечающих условиям нагружения трубки-заготовки при формообразовании силфона, следует отметить метод испытания трубных заготовок внутренним гидростатическим давлением [4, 5], который может быть успешно использован для построения диаграмм упрочнения и оценки технологической пластичности металла [5].

Настоящий метод испытания позволяет осуществлять любые соотношения между осевыми и окружными растягивающими напряжениями. Получение диаграммы растяжения материала трубок-заготовок, испытываемых в общем случае в условиях двухосного напряженного состояния, сводится к получению зависимости между интенсивностью напряжений σ_i и интенсивностью деформаций ϵ_i , которые определяются из известных выражений:

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_\theta^2 - \sigma_\theta \sigma_1 + \sigma_1^2}; \quad (1)$$

$$\epsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\epsilon_\theta - \epsilon_1)^2 + (\epsilon_1 - \epsilon_s)^2 + (\epsilon_s - \epsilon_\theta)^2}, \quad (2)$$

где σ_θ , σ_1 - главные компоненты напряжения в окружном и продольном направлениях соответственно; ϵ_θ , ϵ_1 , ϵ_s - главные компоненты деформации в окружном, продольном и по толщине стенки (утолщение) направлениях соответственно.

Между главными напряжениями, давлением P и осевой сжимающей силой N существуют зависимости [4]:

$$\sigma_1 = \sigma_\theta = Pd/2s; \quad (3)$$

$$\sigma_2 = \sigma_3 = (Pd/4s) - (N/\pi ds); \quad (4)$$

$$\sigma_3 = \sigma_s^1 \approx 0, \quad (5)$$

где d и s - соответственно диаметр и толщина стенки трубки-заготовки.

Главные компоненты деформации определяются как:

$$\epsilon_1 = \epsilon_\theta = \ln(\Delta b_k/\Delta b_0); \quad \epsilon_2 = \epsilon_3 = \epsilon_s = \ln(\Delta l_k/\Delta l_0); \quad \epsilon_3 = \epsilon_s = \ln(s_k/s_0), \quad (6)$$

где Δb_0 , Δl_0 , s_0 и Δb_k , Δl_k , s_k - соответствующие линейные размеры элемента до и после деформации.

Варьирование осевой силой N позволяет получить требуемое соотношение компонент напряжений $m = \sigma_1/\sigma_\theta$.

Практический интерес при испытании силфонных трубок-заготовок представляет изменение m в интервале $0 \leq m \leq 0,5$,

что соответствует изменению осевой сжимающей силы в диапазоне

$$(P \pi d^2 / 4) \geq N \geq 0. \quad (7)$$

Выражение (7) охватывает практически все возможные значения осевой силы при формообразовании сильфона.

Задаваясь значениями m , нетрудно получить соотношения между главными компонентами деформации [4]. Так, в случае плоской деформации при $m = 0,5$ будем иметь:

$$\epsilon_1 / \epsilon_\theta = 0; \quad \epsilon_s / \epsilon_\theta = -1. \quad (8)$$

В случае одноосного растяжения в окружном направлении ($m = 0$):

$$\epsilon_1 / \epsilon_\theta = -0,5; \quad \epsilon_s / \epsilon_\theta = -0,5. \quad (9)$$

На практике соотношения (9) не соответствуют экспериментально определенным с использованием выражений (6). Более близкими получаются соотношения (8), хотя в испытываемой трубке создается одноосное растяжение в окружном направлении. Это связано с тем, что в образцах, у которых толщина существенно меньше ширины [6], происходит деформация монотонного сдвига, т. е. плоская деформация в направлении действия растягивающей силы, укорочение в направлении толщины образца. Ширина образца (в нашем случае длина трубки) при этом не меняется из-за сдерживания деформации в данном направлении. Изменение соотношения компонент напряжения в указанном интервале m сохраняет практически постоянными соотношения компонент деформации (8), которые имеют место при плоском деформировании широких образцов.

Это обстоятельство необходимо учитывать при выборе схемы испытаний сильфонных трубок-заготовок. Поскольку при всех значениях осевой сжимающей силы в рассматриваемом интервале (7) имеет место плоское деформирование с практически неизменным соотношением компонент деформации, то наиболее рациональным будет нагружение, которое технически реализуется наиболее просто. Это требование выполняется при отсутствии осевой сжимающей силы, $N=0$. Испытываемая трубка нагружается только внутренним давлением. Один из концов трубки остается свободным.

Интенсивность напряжения при этом выражается через окружную компоненту напряжения

$$\sigma_i = 0,87 \sigma_\theta, \quad (10)$$

а интенсивность деформации через соответствующую компоненту деформации

$$\epsilon_i = 1,15 \epsilon_\theta. \quad (11)$$

Соотношения (10), (11) являются однозначно определенными и постоянными в процессе всего деформирования.

Таблица 1. Сравнительные данные расчета и эксперимента

Материал	№ трубок, i	Средние значения размеров ячеек до деформации			Средние значения размеров ячеек после деформации			$\epsilon_{bi} = \ln \frac{b_{ik}}{b_{io}}$	$\epsilon_{li} = \ln \frac{l_{ik}}{l_{io}}$	$\epsilon_{si} = \ln \frac{s_{ik}}{s_{io}}$	$\frac{\epsilon_{li}}{\epsilon_{\theta i}}$	$\frac{\epsilon_{si}}{\epsilon_{\theta i}}$
		b_{i0} , мм	l_{i0} , мм	s_{i0} , мм	b_{ik} , мм	l_{ik} , мм	s_{ik} , мм					
36НХТЮ	1	6,2	4,0	0,158	8,10	4,0	0,121	0,267	0	-0,267	0	-1,000
	2	-	-	0,159	8,35	-	0,120	0,298	-	-0,281	-	-0,943
	3	-	-	0,159	8,15	-	0,120	0,273	-	-0,281	-	-1,029
	4	-	-	0,157	8,40	-	0,116	0,304	-	-0,304	-	-1,000
	5	-	-	0,159	8,25	-	0,119	0,286	-	-0,290	-	-1,014
БрБ2	1	6,2	4,0	0,162	8,65	4,0	0,117	0,333	0	-0,325	0	-0,976
	2	-	-	0,160	8,70	-	0,114	0,339	-	-0,339	-	-1,000
	3	-	-	0,161	8,65	-	0,116	0,333	-	-0,329	-	-0,988
	4	-	-	0,159	8,50	-	0,116	0,316	-	-0,315	-	-0,997
	5	-	-	0,161	8,80	-	0,114	0,350	-	-0,345	-	-0,986
12Х18Н10Т	1	6,2	4,0	0,155	8,55	4,0	0,114	0,321	0	-0,310	0	-0,956
	2	-	-	0,157	8,75	-	0,110	0,345	-	-0,356	-	-1,032
	3	-	-	0,154	8,60	-	0,110	0,327	-	-0,336	-	-1,028
	4	-	-	0,158	8,60	-	0,113	0,327	-	-0,335	-	-1,024
	5	-	-	0,155	8,70	-	0,112	0,339	-	-0,329	-	-0,971
Л80	1	6,2	4,0	0,157	8,80	4,0	0,108	0,350	0	-0,374	0	-1,069
	2	-	-	0,156	8,95	-	0,108	0,367	-	-0,367	-	-1,000
	3	-	-	0,159	8,90	-	0,112	0,362	-	-0,350	-	-0,967
	4	-	-	0,159	8,95	-	0,110	0,367	-	-0,368	-	-1,003
	5	-	-	0,158	8,80	-	0,110	0,350	-	-0,362	-	-1,034

Соотношения (8) получены при условии изотропности материала, т. е. постоянства модуля упрочнения по трем главным направлениям.

В работе [2] отмечается существенная анизотропия сильфонных трубок-заготовок из материала X18H10T. Наличие анизотропии материала должно изменить соотношения компонент деформации (8) при условии, если этот фактор будет оказывать большее воздействие на общую картину деформирования, чем рассмотренный выше и заключающийся в сдерживании деформации в направлении продольной оси трубки.

С целью проверки соотношения между компонентами деформации, которые получены теоретически, была проведена серия экспериментов. Испытывались сильфонные трубки-заготовки из материалов, применяемых для изготовления сильфонов по ГОСТ 21482-76: 36НХТЮ, БрБ2, 12Х18Н10Т и Л80, диаметром $d = 20$ мм, толщиной стенки $s = 0,16$ мм, в количестве 5 шт. каждого материала. Для определения величин деформации был использован метод сеток. На трубках-заготовках, в их средней части, была нанесена сетка $6,2 \times 4,0$ мм, по изменениям размеров ячеек которой, а также толщины стенки в процессе деформирования определялись компоненты деформации соответствующих участков. Замеры выполнялись на микроскопе МБС-1 и толщиномере 4СМ2.679.002. Испытания проводились на сильфонном формовочном станке С-2 с применением специального герметизирующего зажима со стороны свободного конца трубки-заготовки. Второй конец трубки герметизировался зажимом станка, через который подавалась рабочая жидкость в полость трубки.

Анализ результатов эксперимента (табл. 1) показывает, что соотношения компонент деформации при плоском напряженном состоянии ($m = 0,5$) в пределах точности измерения соответствуют полученным теоретически в предположении изотропности материала. Возможная анизотропия не изменяет указанные соотношения компонент деформации, поскольку эффект сдерживания деформации по длине трубки-заготовки преобладает над эффектом, являющимся следствием анизотропии материала. Материал ведет себя при рассматриваемой схеме нагружения как изотропный, по существу таковым не являясь. Это позволяет при определении интенсивностей напряжения и деформации использовать выражения (10) и (11). Таким образом, наиболее полно соответствует условиям, которые имеют место при формообразовании сильфона, метод гидрораздачи. Причем наиболее рациональной является схема нагружения только внутренним гидростатическим давлением при отсутствии осевой сжимающей силы.

Л и т е р а т у р а

1. Кроха В.А. Кривые упрочнения металлов при холодной деформации. - М.: Машиностроение, 1968. - 131 с.
2. Щеглов Б.А., Гловацкий Е.Д., Голованов В.М. Механические свойства тонких листов и труб из стали X18H10T в условиях одноосного и двухосного растяжений. - В сб.: Исследование процессов пластического течения металлов. М.: Наука, 1971, с. 76-84.
3. Государственные стандарты СССР. Трубы металлические и соединительные части к ним. - М.: Стандартгиз, 1978.
4. Расчеты на прочность в машиностроении / С.Д.Пономарев, В.Л.Бидерман, К.К.Лихарев и др. - М.: Машгиз, 1956, т. 1. - 881 с.
5. Шофман Л.А. Теория и расчеты процессов холодной штамповки. - М.: Машиностроение, 1964. - 375 с.
6. Смирнов-Аляев Г.А. Сопротивление материалов пластическому деформированию. - Л.: Машиностроение, 1978. - 368 с.

УДК 621.983:621.787

И.Г.Добровольский, канд.техн.наук (БПИ),
И.С.Сергеев, инженер, В.С.Шляховой,
инженер (НИИтехноприбор, г. Смоленск)

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПЛАСТИЧНОСТИ ЛИСТОВОГО МАТЕРИАЛА, ПРИМЕНЯЕМОГО ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СИЛЬФОННЫХ ТРУБОК-ЗАГОТОВОК

Для изготовления сильфона заданной конфигурации материал трубки-заготовки должен обладать определенной пластичностью, которая обеспечивает формование сильфона без разрушения. Пластичность материала, определяемая в результате механических испытаний сильфонных трубок-заготовок внутренним гидростатическим давлением [1], является важнейшей технологической характеристикой трубок-заготовок и во многом предопределяется пластичностью исходного металла. При существующей технологии исходным материалом в большинстве случаев являются полосы и ленты толщиной от 0,3 до 2,0 мм в состоянии заводской поставки.

Для получения трубок-заготовок с регламентированной пластичностью исходный листовый материал должен обладать определенными свойствами, которые оцениваются в результате механических испытаний. Между результатами испытаний листово-