

цевич [и др.] // Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка : материалы 10-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 12–14 сент. 2012 г. / Нац. акад. наук Беларуси [и др.]; редкол.: П.А. Витязь (гл. ред.) [и др.]. – Минск : Беларус. навука, 2012. – 325 с.

7. Вращающаяся электрическая печь для химико-термической обработки сыпучего материала : пат. 15412 Респ. Беларусь, МПК7 F27B 7/14 / В.М. Константинов, О.П. Штемпель, В.Г. Щербаков ; заявитель Белорусский национальный технический университет. – № а 20091415 ; заявл. 05.10.09 ; опубл. 28.02.12 // Афіцыйны бюл. / Нац. центр інтэлектуал. уласнасці. – 2012. № 1. – С. 143.

8. Косторнов, А.Г. Проницаемые металлические волокновые материалы / А.Г. Косторнов. – Киев: Техника, 1983. – 123 с.

9. Диаграммы состояния двойных систем: Справочник. В 3 т. / Под. общ. ред. Н.П. Лякишева. – М.: Машиностроение, 1996. – 992 с.

УДК 621.791.13

Г.М. СЕНЧЕНКО, канд. техн. наук,
В.С. НИСС, канд. техн. наук,
Н.И. УРБАНОВИЧ, канд. техн. наук (БНТУ)

СВОЙСТВА БИМЕТАЛИЧЕСКИХ ТРУБНЫХ ЗАГОТОВОК НА ОСНОВЕ СТАЛИ 40Х И СПЛАВА Д16, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ СВАРКИ ВЗРЫВОМ

Во многих отраслях техники (машиностроение, автомобилестроение, станкостроение и т.д.) большое распространение получили гидроцилиндры, основные детали которого, гильза и шток, воспринимают различные по величине и направлению нагрузки (рисунки 1 и 2). На гильзу действует внутренняя распределенная нагрузка с интенсивностью q и растягивающее усилие q_1 от данной нагрузки с той же интенсивностью ($q_1 = q$), а на шток – сжимающая сила P и внешняя распределенная нагрузка с интенсивностью q .

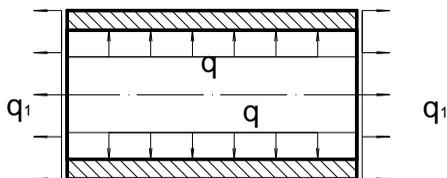


Рисунок 1 – Схема нагружения гильзы

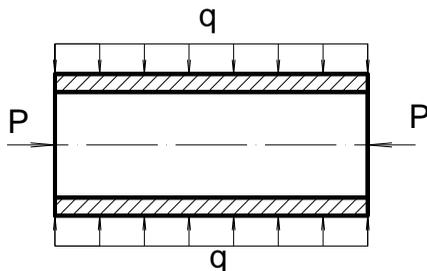


Рисунок 2 – Схема нагружения штока

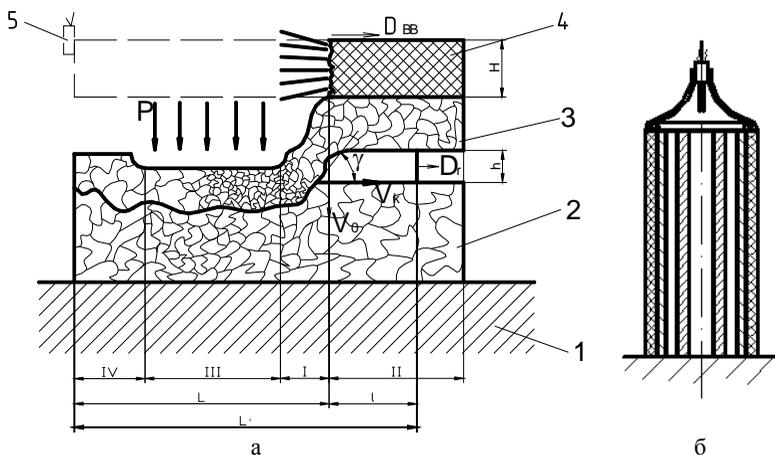
В соответствии с указанными условиями нагружения материал деталей гидроцилиндра должен обеспечить: для гильзы – прочность от действия распределенной нагрузки q и растягивающего усилия q_1 , для штока – прочность и устойчивость от распределенной нагрузки q и сжимающей силы P . Дополнительно к этому гидроцилиндр должен иметь минимально возможную массу, а технология изготовления деталей гидроцилиндра должна быть проста и без значительных экономических затрат. В связи с этим материал деталей гидроцилиндра должен обладать следующими свойствами:

- низкая плотность;
- большая прочность (удельная прочность);
- высокие упругие характеристики;
- жесткость.

Монометалл с указанными характеристиками получить очень сложно. Одним из вариантов решения поставленной задачи является применение композиционных материалов, например на основе стали и легких алюминиевых сплавов, полученных методом сварки взрывом (СВ).

Отличительной особенностью СВ является возможность совмещения процесса сварки с упрочнением свариваемых материалов прохождением ударных волн и высокоскоростной пластической деформацией. В сочетании с термической обработкой можно добиться упрочнения материала в 2,5–3,0 раза [1, 2].

Сущность СВ заключается в том, что свариваемые заготовки, неподвижную 2 и метаемую 3 (рисунок 3), устанавливают с зазором h друг к другу на основании 1 (в случае плоских заготовок) или оправке (в случае цилиндрических заготовок), на метаемой заготовке располагают заряд взрывчатого вещества (ВВ) 4 высотой H , который детонируют электродетонатором 5.



а – сварка плоских заготовок; б – сварка цилиндрических заготовок

1 – основание (оправка); 2 – неподвижная заготовка; 3 – метаемая заготовка;
4 – заряд ВВ; 5 – электродетонатор

Рисунок 3 – Схема сварки взрывом

Под действием давления продуктов детонации ВВ заготовка 3 с большой скоростью (200–800 м/с) соударяется с заготовкой 2, обеспечивая тем самым физический контакт свариваемых материалов (зона I). При этом в зоне II происходит очистка свариваемых поверхностей от загрязнений и их подготовка к схватыванию. В результате косоугольного соударения свариваемых заготовок и интенсивной сдвиговой пластической деформации металлов происходит образо-

вание сварного соединения (зона III), если под действием волны разгрузки, следующей за волной сжатия в зоне IV, не произойдет разрушения возникшей связи слоев.

В связи со спецификой композиционных материалов и методом их получения (сварка взрывом) становятся актуальными вопросы расчета на прочность биметаллических труб и определения их механических свойств. В данной работе рассматриваются вопросы определения механических свойств материала биметаллических труб (сталь 40X – сплав Д16Т), полученных методом СВ.

Для определения механических характеристик материала биметаллической трубной заготовки в продольном направлении использовали испытания на растяжение специальных сегментных образцов (рисунок 4).

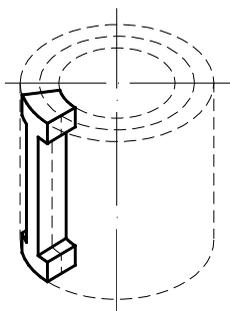


Рисунок 4 – Биметаллический образец для испытаний на растяжение

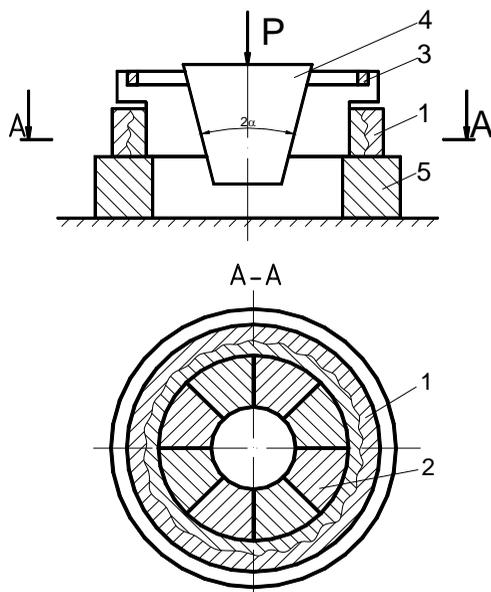
С целью определения зависимости прочностных и пластичных свойств материала от толщины упрочняющего слоя (сталь 40X) образцы изготавливали с различным соотношением слоев. Для каждого типоразмера изготавливали по 3 образца, длина которых в 5 раз превосходила их ширину.

Для определения свойств трубного материала в тангенциальном направлении известна схема испытаний, когда испытываемое кольцо растягивается с помощью двух сегментов. Однако эта схема имеет недостатки, связанные с условиями испытаний, при которых практически вся прикладываемая нагрузка локализуется в двух диаметрально противоположных точках, расположенных в плоскости, перпендикулярной направлению действия растягивающего усилия. Поэтому схема напряженного состояния материала существ-

венно отличается от реальной, возникающей под действием внутреннего давления.

Недостатки можно устранить, применив схему испытаний, основанную на вдавлении конуса в испытываемое кольцо. В этом случае нагрузка равномерно распределяется по периметру кольца, что соответствует схеме нагружения внутренним давлением. Но данная схема испытаний также имеет недостатки, основными из которых является неравномерное распределение нагрузки по высоте кольца и наличие осевой составляющей нагрузки, что при небольшой прочности на срез зоны соединения может привести к разрушению кольца.

Для испытания материала биметаллической трубной заготовки предложена схема, представленная на рисунке 5.



1 – кольцо биметаллическое испытываемое; 2 – сегменты;
3 – кольцо центрирующее; 4 – конус; 5 – упор

Рисунок 5 – Схема испытаний биметаллических колец

Растяжение кольца 1 производили с помощью восьми сегментов 2, внутренняя поверхность которых является конической. Собранные вместе и установленные с помощью центрирующего кольца 3, они образуют коническое отверстие, куда входит конус 4. Осевая составляющая нагрузки P компенсируется упором 5 и на испытываемое кольцо не передается. Для уменьшения влияния сил трения сопрягаемые поверхности пуансона, сегментов и упора покрываются смазкой.

Расчетную нагрузку, действующую на биметаллическое кольцо, определяли из условия, что вся энергия, затрачиваемая на перемещение пуансона в осевом направлении, идет на работу по разрушению кольца:

$$P \cdot s = q \cdot 2\pi R t \cdot s \cdot \operatorname{tg} \alpha,$$

где P – сила, действующая на пуансон; s – осевое перемещение пуансона; q – распределенная нагрузка, действующая на испытываемое кольцо; R – внутренний радиус кольца; t – высота кольца.

Откуда

$$q = \frac{P \cdot \operatorname{ctg} \alpha}{2\pi R t}. \quad (1)$$

При определении механических характеристик материала действующие напряжения находили из выражения [3]:

$$\sigma = \frac{qR}{\delta}, \quad (2)$$

где δ – толщина кольца.

Подставляя в формулу (2) значение нагрузки q из выражения (1) для $\sigma_{\text{в}}$ и $\sigma_{0,2}$, получим:

$$\sigma_{\text{в}} = \frac{P_{\text{max}} \cdot \operatorname{ctg} \alpha}{2\pi t \delta};$$

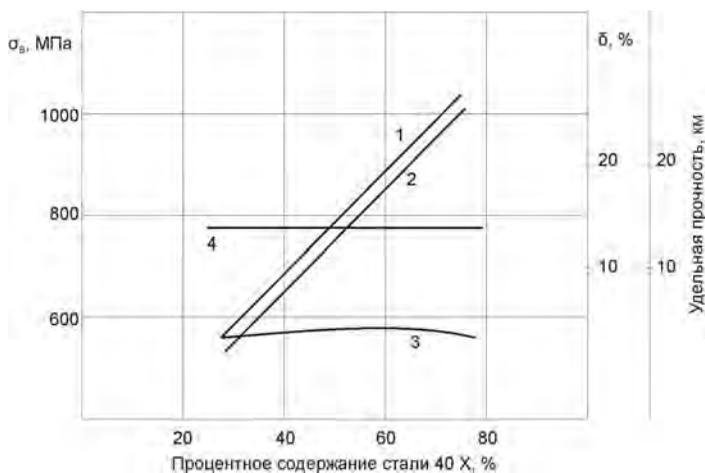
$$\sigma_{0,2} = \frac{P_{0,2} \cdot \operatorname{ctg} \alpha}{2\pi t \delta}.$$

Испытания проводили на универсальной испытательной машине «Instron».

Результаты испытаний сегментных образцов длиной 40 мм (рисунок 4) представлены в таблице 1 и на рисунке 6.

Таблица 1 – Результаты испытаний материала биметаллических трубных заготовок в продольном направлении

Процентное содержание стали, %	28,0	34,5	37,8	52,7	58,1	66,1	72,7	78,4
Усилие разрушения, Н	13320	12000	12240	16720	25680	28400	23000	24480
Усилие предела текучести, Н	13010	11740	12000	16450	25260	27830	22630	24130
Абсолютное удлинение, мм	1,8	2,0	2,0	2,2	2,8	2,6	2,2	2,6
Временное сопротивление разрыву, МПа	585	621	618	786	807	848	919	938
Предел текучести, МПа	571	608	606	773	794	831	904	925
Относительное удлинение, %	4,5	5,0	5,0	5,5	7,0	6,5	5,5	6,5
Удельная прочность, 10^4 м	1,42	1,39	1,34	1,46	1,43	1,40	1,43	1,40



1 – временное сопротивление разрыву; 2 – предел текучести;
3 – относительное удлинение; 4 – удельная прочность

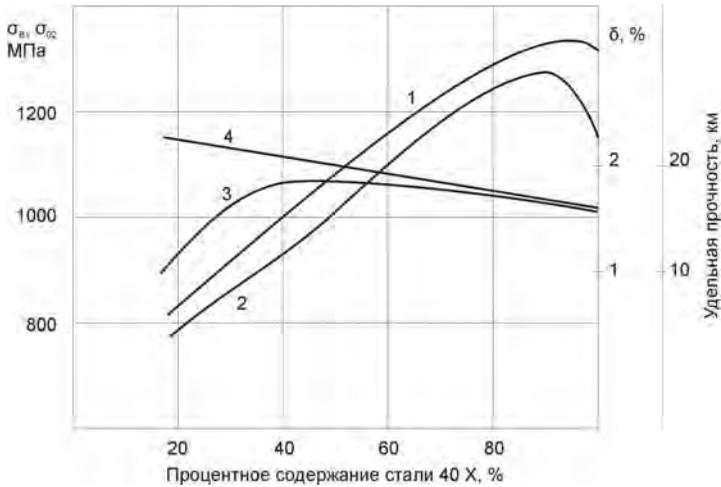
Рисунок 6 – Механические свойства материала биметаллической трубной заготовки

Прочностные характеристики биметаллического материала в продольном направлении пропорциональны процентному содержанию стали 40X, пластичные же свойства достигают своего максимума ($\delta_0 = 7\%$) при 60 % содержания стали, а затем незначительно падают, повышается жесткость материала ($\sigma_{0,2}/\sigma_B \approx 98-99\%$). Удельная прочность не зависит от соотношения стальной и алюминиевой составляющих композиционного материала (КМ) и находится на уровне $1,4 \cdot 10^4$ м. Повышение прочности КМ обеспечивается за счет упрочнения стали 40X и сплава Д16 в процессе сварки взрывом [1, 2].

Результаты испытаний биметаллических колец для определения характеристик материала в тангенциальном направлении приведены в таблице 2 и на рисунке 7. Испытания проводили на разрывной машине Р-20 при $\alpha = 15^\circ$ и $t = 3$ мм. Внутренний диаметр колец колебался от 100 до 108 мм в зависимости от содержания стали 40X.

Таблица 2 – Результаты испытаний биметаллических колец

Процентное содержание стали	Усилие разрушения, Н	Усилие предела текучести, Н	σ_B , МПа	Предел текучести, МПа	Удельная прочность, м	Относительное удлинение, %
17,60	43200	40730	822	775	$2,32 \cdot 10^4$	1,1
17,90	44600	43140	858	830	$2,51 \cdot 10^4$	1,3
19,70	44600	41800	861	807	$2,37 \cdot 10^4$	1,5
23,95	51200	47150	897	826	$2,35 \cdot 10^4$	1,5
24,10	50900	47180	916	849	$2,39 \cdot 10^4$	1,0
25,00	52000	46750	941	846	$2,42 \cdot 10^4$	1,2
36,80	63500	53870	976	828	$2,19 \cdot 10^4$	2,0
36,90	62200	54130	986	858	$2,22 \cdot 10^4$	2,0
37,20	64600	54350	971	817	$2,18 \cdot 10^4$	1,6
60,70	46200	43770	1140	1080	$2,00 \cdot 10^4$	1,8
61,10	48600	45460	1209	1131	$2,12 \cdot 10^4$	1,7
62,70	48400	44670	1260	1163	$1,21 \cdot 10^4$	1,9
90,30	37800	36220	1360	1303	$1,87 \cdot 10^4$	1,8
100,00	32400	27780	1352	1159	$1,73 \cdot 10^4$	1,7



1 – временное сопротивление разрыву; 2 – предел текучести;
3 – относительное удлинение; 4 – удельная прочность

Рисунок 7 – Механические свойства материала биметаллической трубной заготовки

Механические свойства материала биметаллических трубных заготовок в тангенциальном направлении существенно отличаются от аналогичных характеристик в продольном направлении. За счет деформационного упрочнения и остаточных напряжений [4], возникающих после обработки материала взрывом, временное сопротивление разрыву и предел текучести увеличиваются в 1,2–1,3 раза. Это повышает удельную прочность материала в 1,4–1,7 раза, которая в данном случае уже является функцией от процентного содержания стали 40Х: с увеличением последней удельная прочность падает по линейному закону. Объясняется это тем, что в процессе сварки взрывом свариваемые заготовки нагреваются выходящим из сварочного зазора воздухом, теплом, выделяемым при детонации взрывчатого вещества, при объемной пластической деформации и контактном взаимодействии свариваемых заготовок. В дальнейшем, при охлаждении сваренной биметаллической заготовки, возникают

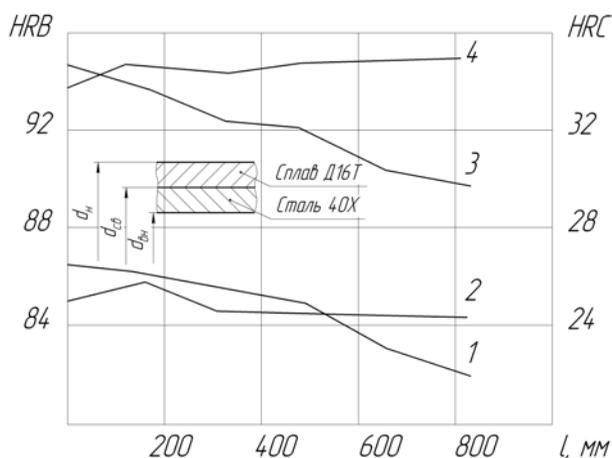
температурные напряжения, обусловленные различными значениями коэффициента теплового расширения для стали 40Х и алюминиевого сплава Д16Т (для стали 40Х он значительно меньше, чем для сплава Д16Т). Причем, чем больше процентное содержание алюминиевого сплава, тем больше величина остаточных напряжений, что определяет повышение удельной прочности биметаллического материала в тангенциальном направлении. Таким образом, сварка взрывом биметаллических трубных заготовок позволяет значительно повысить прочностные характеристики последних в тангенциальном направлении и, соответственно, снизить их массу, как за счет упрочнения компонентов композиционного материала (например, для стали 40Х временное сопротивление разрыву возрастет с 1250 МПа до 1350 МПа), так и за счет остаточных напряжений, обусловленных разными теплофизическими свойствами компонентов.

Одновременно с повышением в тангенциальном направлении прочностных характеристик биметалла существенно падает его пластичность. Так, при содержании стали 35–40 %, когда наблюдается максимум пластичных свойств, относительное удлинение достигает 2 %. В связи с этим целесообразным является изготовление биметаллических заготовок с содержанием стали 40Х 35–40 % с удельной прочностью композиционного материала $2,2 \cdot 10^4$ м.

Для определения влияния длины заготовки на механические свойства материала измеряли твердость HRC (сталь 40Х) и HRB (сплав Д16Т) наружных и внутренних поверхностей стали 40Х и сплава Д16Т. Для измерения твердости наружной поверхности стали 40Х и внутренней поверхности сплава Д16Т биметаллические образцы раскалывались по зоне сварки. Результаты измерений показаны на рисунке 8. Направление отсчета длины заготовки совпадает с направлением детонации взрывчатого вещества.

В начале заготовки твердость сопрягаемых поверхностей стали 40Х и сплава Д16Т больше, чем твердость свободных поверхностей указанных материалов. Связано это с тем, что при сварке взрывом происходит интенсивная пластическая деформация приконтактных слоев материалов с соответствующим их упрочнением. С увеличением длины заготовки твердость сопрягаемых поверхностей посте-

пенно падает и в конце заготовки уже становится значительно меньше твердости свободных поверхностей. Данное уменьшение твердости обусловлено специфическими особенностями СВ, в частности, расположением свариваемых заготовок с зазором друг к другу. В процессе сварки взрывом воздух, находящийся в сварочном зазоре, выходит под большим давлением и разогревает свариваемые поверхности [5, 6]. Чем больше длина заготовки, тем больше давление, скорость и температура выходящего воздуха, а, следовательно, тем сильнее сказывается влияние отпуска приконтактных слоев свариваемых материалов на их механические свойства.



1 – внутренняя поверхность сплава Д16Т; 2 – наружная поверхность сплава Д16Т;
3 – наружная поверхность стали 40Х; 4 – внутренняя поверхность стали 40Х

Рисунок 8 – Механические свойства (твердость) материала биметаллической трубной заготовки

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

- в продольном направлении жесткость цилиндрической биметаллической заготовки «сталь 40Х – сплав Д16Т» повышается до $\sigma_{0,2}/\sigma_b = 98-99 \%$, а удельная прочность не зависит от соотношения ее стальной и алюминиевой составляющих и находится на уровне $1,4 \cdot 10^4$ м;

- в тангенциальном направлении удельная прочность биметаллических цилиндрических заготовок повышается в 1,4–1,7 раза;
- оптимальным содержанием стали 40Х в составе КМ является 35–40 %, при этом удельная прочность КМ составляет $2,2 \cdot 10^4$ м.

Литература

1. Ковалевский, В.Н. Деформационно-термическое упрочнение сплава Д16 с использованием энергии взрыва / В.Н. Ковалевский, Г.М. Сенченко // Порошковая металлургия: достижения и проблемы: сб. докл. Междунар. науч.-техн. конф. – Минск, 2005. – С. 246–249.

2. Ковалевский, В.Н. Деформационно-термическое упрочнение стали 40Х с использованием энергии взрыва / В.Н. Ковалевский, Г.М. Сенченко // Литье и металлургия. – Минск, 2005. – № 4 (36). – С. 154–156.

3. Прочность, устойчивость, колебания: Справочник в 3-х т. / под ред. И.А. Биргера, Я.Г. Пановко. – М.: Машиностроение, 1986. – Т. 1. – 831 с.

4. Ковалевский, В.Н. Определение температурных полей и термонапряжений при сварке взрывом трубных заготовок из дюралюминиевого сплава Д16 и стали 40Х / В.Н. Ковалевский, Г.М. Сенченко, В.С. Нисс // Металлургия: Республ. межведом. сб. науч. тр.: в 2 ч. – Минск: БНТУ, 2013. – Вып. 34, ч. 1. – С. 188–196.

5. Ишуткин, С.Н. Исследование теплового воздействия ударно-сжатого газа на поверхность соударяющихся пластин / С.Н. Ишуткин, В.И. Кирко, В.А. Симонов // Физика горения и взрыва. – 1980. – Т. 16. – № 6. – С. 69–73.

6. Ковалевский, В.Н. Термодинамические процессы при сварке взрывом углеродистых сталей и сплавов цветных металлов / В.Н. Ковалевский, Г.М. Сенченко // Металлургия: Республ. межведом. сб. науч. тр.: в 2 ч. – Минск: БНТУ, 2011. – Вып. 33, ч. 2. – С. 85–95.