

УДК 621.778.669

ОСОБЕННОСТИ ВОЛОЧЕНИЯ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ КОМПОЗИТНЫХ ИЗДЕЛИЙ С ВОЛОКНИСТЫМ СЕРДЕЧНИКОМ ИЗ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

© 2014 г. В.В. Битков

Институт машиноведения (ИМАШ) УрО РАН, г. Екатеринбург

Статья поступила в редакцию 25.04.2012 г., подписана в печать 23.11.2012 г.

Механизм пластической деформации осесимметричных композитных изделий с разнородными компонентами в процессе волочения является более сложным, чем при аналогичной обработке монометалла. В силу специфики напряженно-деформированного состояния процессу осесимметричного волочения присуща постоянная неоднородность деформации, которая зависит от величины обжатия в проходе, угла конуса волокна, относительной длины калибрующего пояска волокна, коэффициента трения между проволокой и волоком в очаге деформации, коэффициента прочности соединения поверхностей раздела сердечника и оболочки, относительного размера сердечника, отношения напряжений пластического течения оболочки и сердечника. Путем экспериментальных исследований установлены особенности процесса волочения композитных изделий с моно- и многоволоконным сердечником и условия реализации однородного пропорционального течения обоих компонентов без образования разрывов сплошности сердечника, поверхностных надрывов оболочки и обрыва самого изделия.

Ключевые слова: осесимметричное волочение, многоволоконный композит, биметаллическая проволока, разрушение оболочки, медная оболочка, титановый сердечник.

The mechanism of plastic deformation of axisymmetric composite articles with heterogeneous components in the course of drawing is more difficult than in case of monometal processing. Because of the specificity of stress and strain state, the axisymmetric drawing is characterized by permanent inhomogeneity of strain, which depends on the reduction value in pass, reducing die cone angle, relative length of drawing cylinder of the reducing die, coefficient of friction between wire and reducing die in the deformation zone, core/cover separation surface joint strength factor, relative size of the core, and ratio of flow stress of the cover and core. By means of experimental studies the features of composite article drawing process with mono- and multi-fiber core and the conditions of implementation of homogeneous proportional flow of both components without tearing the core continuity, surface tears of the cover and break of the article itself have been found.

Key words: axisymmetric drawing, multi-fiber composite, bimetallic wire, cover damage, copper cover, titanium core.

Механизм пластической деформации осесимметричных композитных изделий в процессе волочения является более сложным, чем при аналогичной обработке монометалла. Это вполне закономерно, поскольку у композитный образец представляет собой соединение двух и более разнородных материалов. Их различное сочетание позволяет получать волочением изделия разных форм с высокими показателями электропроводности, сопротивления коррозии и износостойкости. При этом появляется возможность обеспечения у них надлежащих прочностных характеристик и более низкой массы.

Физические, механические и другие свойства компонентов композитного изделия могут полностью отличаться друг от друга. При их совместном пластическом деформировании в процессе волочения через коническую волоку возникает необходимость отдельного рассмотрения зоны деформации сердечника и оболочки. В силу специфики напряженно-деформированного состояния процессу осесимметричного волочения присуща постоянная неоднородность деформации, величина которой зависит от следующих независимых между собой параметров: величина обжатия за проход, полуугол рабочего конуса волокна, относительная длина ка-

Битков В.В. – канд. техн. наук, ст. науч. сотр. ИМАШ УрО РАН (620049, г. Екатеринбург, ул. Комсомольская, 34).
Тел.: (343) 375-35-90. E-mail: lsm@imach.uran.ru; bitkov-vlad@mail.ru.

либрирующего пояса волокна, коэффициент трения между проволокой и волоком в очаге деформации, коэффициент прочности соединения поверхностей раздела сердечника и оболочки, относительный размер сердечника, отношение напряжений пластического течения оболочки и сердечника, величина относительного противонапряжения. Неоднородность деформации при волочении ввиду наличия деформации сдвига устранить не представляется возможным, но уменьшить ее размеры можно путем подбора подходящих параметров геометрии очага деформации и создания идеальных условий трения.

Основная цель экспериментальных исследований состояла в установлении особенностей процесса волочения композитного изделия с моно- и многоволоконным сердечником и условий реализации однородного пропорционального течения обоих компонентов без образования разрывов сплошности сердечника, поверхностных надрывов оболочки и обрыва самого изделия.

В работе [1] были получены основные аналитические решения по пластическому течению биметаллических осесимметричных изделий. Методом верхней оценки были определены критерии, использование которых помогало устранить причины разрушения как оболочки, так и сердечника. Также была предложена формула для расчета изменения радиуса сердечника при волочении биметаллического осесимметричного изделия [1]:

$$R_{fi} = R_f \frac{R_i}{R_0} \left\{ 1 + \varepsilon \frac{e}{R_0} \left[\left(\frac{R_0}{R_i} \right)^2 - 1 \right] \right\}, \quad (1)$$

где R_{fi} и R_f — радиусы сердечника и биметаллического изделия на выходе волокна, R_i и R_0 — соответственно их радиусы на ее входе, ε и e — псевдонезависимые параметры процесса волочения биметалла. Первый параметр (ε) определяет положение границы раздела оболочки и сердечника на выходе волокна. При $\varepsilon > 0$ наблюдается утонение оболочки, при $\varepsilon < 0$ — ее утолщение, а при $\varepsilon = 0$ изменения величины R_i/R_{fi} при обжатии изделия нет. Вторым параметром (e) является величиной эксцентриситета центра тороида и центра сферы, поскольку при анализе течения оболочки и сердечника биметаллического тела используются соответственно кинематически возможные тороидальное и сферическое поля скоростей.

Необходимость подобного исследования объясняется тем, что иногда возникает потребность изготовления небольших опытных партий композитных

осесимметричных изделий с компонентами, позволяющими обеспечить изделию уникальные специфические свойства.

Были созданы три вида биметаллических изделий с проволочными моносердечниками диаметром 3,0 мм (Cu, Al и Ti), сформированных путем размещения сердечника в специально подготовленную оболочку — медную трубку (содержание меди $\geq 99,97\%$, наружный и внутренний диаметры — 4,95 и 3,25 мм соответственно), и три вида биметаллических изделий с многоволоконным сердечником, у которых оболочкой также служила медная трубка (наружный и внутренний диаметр — 6,35 и 4,83 мм соответственно), а сердечник представлял собой 61 проволочное волокно (Cu, Al или Ti) диаметром 0,5 мм (рис. 1). Выбор числа волокон определялся максимально возможной вместимостью при ручной вставке в трубку предварительно выправленных растяжением проволочек. Граничные поверхности оболочки и сердечника подвергались очистке и обезжириванию. Фиксация сердечника в оболочке выполнялась путем острения заправочного конца биметалла на острильной машине. В первом проходе волочения биметалла с моносердечником устранялся зазор между сердечником и оболочкой изделия. При многоволоконном сердечнике заполняемость внутреннего канала оболочки проволочными волокнами составляла 65,4 % и для устранения зазоров и пустот требовалось несколько проходов волочения. Его маршрут, а также данные об угле рабочего конуса и величине обжатия за проход приведены в таблице.

Для проведения экспериментальных исследований волочения биметаллических изделий использовалась разрывная испытательная машина 2166 P5 усилием 5 кН. При этом было принято, что внутренний диаметр оболочки равен диаметру сердечника после устранения всех зазоров. Важно было также выявить технологические особенности при совместном деформировании разнородных материалов, имеющих одни и те же линейные размеры компонентов. Для биметаллического изделия Cu—Ti справедливо соотношение $\sigma_{0o} < \sigma_{0c}$, для Cu—Cu — $\sigma_{0o} =$



Рис. 1. Фрагмент сборки композитного изделия Cu—Ti
Сердечник — 61 волокно Ti диаметром 0,5 мм

Маршрут волочения композитного изделия с многоволоконным сердечником и величина обжатия (δ) по проходам

Проход	Диаметр оболочки, мм		Диаметр сердечника, мм	δ , %
	Начальный	Конечный		
1	6,35	5,84	3,0	15,4
2	5,84	5,35	3,0	16,1
3	5,35	4,57	2,56	27,0
4	4,57	4,24	2,38	13,9
5	4,24	3,90	2,19	15,4
6	3,90	3,59	2,02	15,3
7	3,59	3,13	1,77	24,0
8	3,13	2,69	1,53	26,1
9	2,69	2,25	1,28	30,0
10	2,25	1,91	1,08	27,9
11	1,91	1,62	0,92	28,1
12	1,62	1,50	0,85	14,3
13	1,50	1,30	0,74	24,8
14	1,30	1,22	0,69	11,9
15	1,22	1,16	0,65	9,6

Примечание. Полуугол рабочего конуса волокна $\alpha = 6$ град.

$= \sigma_{0c}$, для Cu—Al — $\sigma_{0c} > \sigma_{0c}$, независимо от конструкции сердечника. В данных условиях σ_{0c} и σ_{0c} означают напряжение пластического течения материала оболочки и сердечника соответственно.

Волочение биметаллических изделий с моносердечником, независимо от его материала, отличалось устойчивым деформированием после устранения зазора между оболочкой и сердечником. Этот технологический зазор практически устраняется в 1-м проходе волочения при вытягивании (удлинении) оболочки за счет преобладания сдвиговых деформаций. Фактически в 1-м проходе происходит процесс безправочного волочения трубы, в качестве которой выступает оболочка композитного изделия. При этом деформации сердечника нет. Во 2-м проходе наблюдается деформация как оболочки, так и сердечника. При этом возможно скольжение по граничной поверхности «оболочка—сердечник». Как только силы сцепления или схватывания достигнут определенной величины, будет возможно совместное одновременное течение обоих компонентов композитного изделия.

Наблюдения показывают, что течение компонентов будет близко к сплошному равномерному и про-

порциональному только в случае применения разовых обжатий сечения не менее 20—25 %. При меньших обжатиях имеет место неравенство вытяжек мягкой оболочки и твердого сердечника (вытяжка оболочки выше), возникающая неравномерность течения приводит к образованию полой оболочки на конце композитного изделия. В случае комбинации материалов Cu—Cu этого практически не происходит. Увеличение этого влияния с ростом суммарного обжатия приводит к прочному схватыванию контактных поверхностей обоих компонентов. При использовании упрочненного волочением алюминиевого сердечника неравномерность и непропорциональность течения могут наблюдаться во всех проходах волочения. Наиболее сильно данный эффект проявляется при волочении композитного изделия, состоящего из мягкой Cu-оболочки и твердого Ti-моносердечника. В первых трех проходах при волочении с $\varnothing 6,0$ мм до $\varnothing 4,95$ мм происходит устранение технологических зазоров. Деформация в 5 последующих проходах приводит к возникновению и развитию «туннеля» на конце изделия при волочении с $\varnothing 4,95$ мм до $\varnothing 3,13$ мм. Вытяжка медной оболочки в каждом проходе превышает вытяжку Ti-сердечника на $\sim 10\div 12$ %. Далее, при волочении с $\varnothing 3,13$ мм до $\varnothing 1,91$ мм (3 прохода), рост длины концевой туннеля прекращается, что позволяет считать течение компонентов биметаллического тела равномерным и пропорциональным. Учитывая склонность титана к холодному свариванию с другими металлами, можно предположить, что в результате деформирования волочением получается сплошная структура биметаллического тела с разными физико-механическими свойствами у поверхностных и внутренних слоев.

Вопрос изменения диаметра сердечника, несомненно, является важным элементом исследования волочения композиционных осесимметричных изделий. Например, в работе [2] при изучении процесса производства композитной проволоки микроскопических размеров из заготовки Ni₈₀Fe₂₀/Cu диаметром 3 мм волочением до $\varnothing 42$ мкм в 82 волокнах было установлено, что отношение диаметра медного сердечника к общему диаметру проволоки остается относительно неизменным в течение всего процесса деформирования. Поэтому условие постоянства объемов, составляющих деформируемое тело, до и после волочения использовалось для предсказания конечных диаметра и длины биметаллической (композитной) проволоки. В работе [3] данное ус-

ловие применялось для расчета диаметра волокон Cu—Fe-компози́тов, который изменялся в широких пределах и при большом суммарном обжатии достигал наноразмерных значений. Экспериментальные исследования по волочению биметаллических композитных изделий с моно- и многоволоконистым сердечниками, проведенные в рамках данной работы, показали, что использование формулы (1) для расчета изменения диаметра сердечника композита является правомерным только при развитом и сплошном пропорциональном пластическом течении оболочки и сердечника. Такое течение может быть реализовано только после устранения технологических зазоров, неизбежных при пакетной сборке составных частей композитных изделий. У биметаллических композитов это зазор между оболочкой и сердечником. В случае осесимметричного многоволоконистого сердечника добавляются зазоры между его волокнами, причем причины их возникновения разделяются на три вида: низкая плотность упаковки; геометрическая форма; нарушение условия симметричности укладки. Зазоры первого вида обычно устраняются при первом обжатии сечения композита. Минимальный зазор третьего вида можно наблюдать только при сборке композита с сердечником, число круглых волокон которого равно 7. Зазоров второго вида обычно избегают применением волокон не круглого, а шестигранного сечения и изготовлением внутреннего канала оболочки соответствующей формы. В нашем исследовании использовались компоненты круглого сечения, поэтому зазоры при сборке образовывали продольные пустоты, часть из которых впоследствии устранялась только при значительной интенсивной пластической деформации.

Следует отметить, что наличие технологических пустот после сборки композитного изделия неизбежно приводит при пластической деформации к трансформации круглого начального сечения волокон в многоугольник. Форма и размеры волокон начинают сильно различаться по сечению сердечника. На рис. 2 изображено поперечное сечение композитной проволоки Cu—Ti диаметром 5,84 мм, сердечник которой содержит 61 волокно титановой проволоки исходным диаметром 0,5 мм. Было установлено, что пустоты присутствуют даже при суммарном обжатии, равном 49 %. Их образование обусловлено зазорами сборки второго и третьего видов. При дальнейшем волочении композитной проволоки часть пустот закроется, а у остальных,

связанных с нарушением симметричности укладки волокон, поперечные размеры будут уменьшаться пропорционально уменьшению размера сердечника. На рис. 2 также представлен разрез композитной проволоки Cu—Ti с сердечником из 49 волокон Ti-проволоки начальным диаметром 0,5 мм. Волокнистый сердечник также был собран в медной трубке с наружным и внутренним диаметрами 8,0 и 5,0 мм соответственно. Величина параметра R_{f1}/R_f для первого композита составила 0,73, для второго — 0,56. У второго изделия уплотнение волокон сердечника закончилось во 2-м проходе, а в 3-м проходе волочения ($\varnothing 7,19$ мм \rightarrow $\varnothing 6,86$ мм) началось его деформирование. Об этом свидетельствуют высокая плотность укладки волокон, отсутствие пустот и изменение круглой формы волокон в центральной части сердечника на многоугольную. Косвенно о начале деформирования сердечника указывает и резкое увеличение усилия волочения в 3-м проходе в сравнении со 2-м — с 1010 до 1795 Н. Наблюдается даже некоторая симметричность расположения волокон. Также можно отметить формирование граничной поверхности между оболочкой и отдельным наружным волокном сердечника в виде дуги. Это объясняется большей твердостью титановых волокон сердечника, т.е. при обжатии оболочки происходит как бы вдавливание круглых наружных твердых волокон сердечника в более мягкую медную оболочку. Длину граничной поверхности можно представить суммой дуг.

Экспериментально было установлено, что развитое и пропорциональное течение оболочки и сердечника у различных композитных проволок начинается при разных значениях суммарного обжатия. На первых проходах обычно происходят деформирование только оболочки и, по мере уменьшения поперечного сечения внутреннего канала, уплотнение пучка волокон сердечника, но без их деформиро-

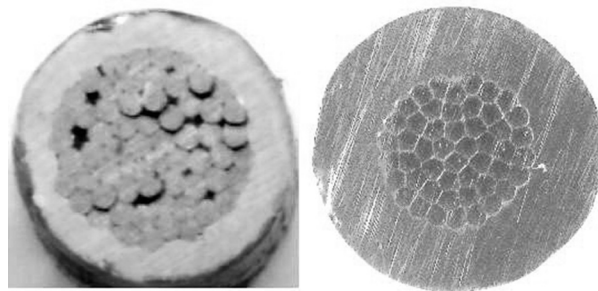


Рис. 2. Сечения композитной проволоки Cu—Ti
В сердечнике слева — 61 волокно, справа — 49 волокон

вания. Усилие волочения композита в этом случае практически не превышает усилие волочения такой же трубки, но без сердечника. На определенном этапе обжатия сечения композитного изделия начинается деформация волокон сердечника, на что указывает изменение усилия в большую сторону. Зачастую при этом имеет место и завершение уплотнения волокон сердечника, поэтому на данном этапе волочения развитого и пропорционального течения оболочки и сердечника нет. На конце композитного изделия продолжает образовываться туннель за счет большего удлинения более мягкой оболочки по сравнению с удлинением твердого сердечника. Таким образом, вытяжки материала оболочки и сердечника становятся в этом случае практически равными.

Длительность процесса устранения внутренних пустот и уплотнения сердечника зависит не только от величины обжатия, но и от величины первоначального наполнения волокнами канала оболочки. В нашем примере для первого композитного изделия с сердечником из 61 волокна наполнение, т.е. отношение общей площади волокон сердечника к площади внутреннего канала, составило 65,4 %. Экспериментально было установлено, что уже во 2-м проходе началось деформирование сердечника при параллельном уплотнении его волокон. Суммарное обжатие оболочки за 2 прохода волочения составило 17,9 %. Для второго изделия наполнение составило 49 %, уплотнение волокон закончилось только в 3-м проходе при суммарном обжатии 26,5 %. Волочение было продолжено до диаметра композитного изделия, равного 3,9 мм, с целью проведения отжига в вакууме. К этому моменту деформирования оболочка получила суммарное обжатие 76,2 %, а сердечник — 51,4 %. Следует отметить, что на последнем проходе первоначально проводилось волочение на $\varnothing 3,75$ мм, но при этом происходили обрывы оболочки. Поэтому было принято решение о снижении частного обжатия в проходе и проведении отжига. С образца проволоки с $\varnothing 3,9$ мм была снята медная оболочка для измерения диаметра волокон сердечника. Разделение волокон сердечника потребовало приложения значительных усилий из-за их прочного сцепления. Данный факт говорит о том, что при волочении композитного изделия с многоволоконным сердечником практически отсутствует продольное скольжение наружных волокон сердечника относительно оболочки при развитом пропорциональном течении и возникает высокое сцепление их с оболочкой.

Волочение композитной сборки Cu—Al с сердечником из 7 круглых волокон алюминия диаметром 1,6 мм выявило следующие особенности. При величине наполнения оболочки, равной 77 %, уплотнение волокон полностью завершилось при 1-м обжатии до $\varnothing 5,35$ мм, далее во время 2-го обжатия до $\varnothing 4,57$ мм происходило устранение всех зазоров, а при последующих проходах волочения наблюдалось устойчивое течение составляющих композита.

На рис. 3 приведено изображение поперечного сечения композита наружным диаметром 4,57 мм. Граничную поверхность раздела оболочки и сердечника можно представить в виде дуг 6 волокон, плавно переходящих одна в другую. Седьмое волокно изначально находилось в центре. Границ волокон в сердечнике не видно при любом увеличении поверхности сечения композитного изделия. Можно предположить, что при пластической деформации произошла холодная сварка мягких волокон алюминия между собой.

Картина течения компонентов композитного изделия резко меняется для случая $\sigma_{00} < \sigma_{0c}$ — например, при многоволоконном сердечнике из титана. Реализация процесса волочения сборки композитного изделия, состоящего из медной оболочки наружным диаметром 6,35 мм и сердечника из 61 волокна титановой проволоки исходным диаметром 0,5 мм, позволила выявить следующие особенности пластического деформирования. Два начальных прохода волочения — $\varnothing 6,35$ мм \rightarrow $\varnothing 6,20$ мм и $\varnothing 6,20$ мм \rightarrow $\varnothing 5,80$ мм — обеспечили устранение всех зазоров и большей части пустот между волокнами с некоторой переориентировкой расположе-

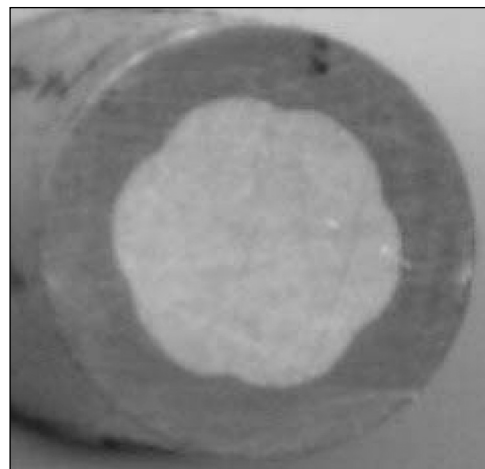


Рис. 3. Сечение композитной проволоки Cu—Al $\varnothing 4,57$ мм
Сердечник — из 7 волокон алюминиевой проволоки

ния и упорядочения волокон. После 1-го прохода длина возникшего концевого туннеля составила 12,4 мм. Прирост длины туннеля во 2-м проходе был равен 26,6 мм. Четыре последующих прохода совместного волочения компонентов изделия по схеме $\varnothing 5,80 \text{ мм} \rightarrow \varnothing 5,36 \rightarrow \varnothing 4,57 \rightarrow \varnothing 4,24 \rightarrow \varnothing 3,91 \text{ мм}$ показали отсутствие образования концевого эффекта во всех проходах. Можно считать, что течение компонентов при совместном пластическом деформировании в этом случае является равномерным и пропорциональным. Далее композитное изделие диаметром 3,91 мм подвергали отжигу в вакууме, после чего было проведено 7 проходов волочения по схеме $\varnothing 3,91 \text{ мм} \rightarrow \varnothing 3,59 \rightarrow \varnothing 3,13 \rightarrow \varnothing 2,70 \rightarrow \varnothing 2,52 \rightarrow \varnothing 2,25 \rightarrow \varnothing 1,91 \rightarrow \varnothing 1,76 \text{ мм}$. Во всех проходах волочения после отжига эффекта концевого туннеля не наблюдалось, так же как и обрывов оболочки и изделия в целом.

На рис. 4 представлен образец разрушения медной оболочки на выходе из волоки при волочении композита с алюминиевым моносердечником с $\varnothing 8,5 \text{ мм}$ на $\varnothing 7,5 \text{ мм}$ (т.е. вариант: твердая оболочка и мягкий сердечник). Края разрыва почти ровные, слегка закруглены и скошены в направлении наружной поверхности. Поверхностные слои оболочки вытянуты больше. Можно предположить, что удлинению внутренних слоев оболочки при волочении препятствовало действие сил сцепления на граничной поверхности между оболочкой и сердечником, но их величины была явно недостаточно для предотвращения скольжения оболочки относительно сердечника. При этом имело место утонение в процессе вытяжке, т.е. снижение толщины оболочки и наружного диаметра, но без уменьшения внутреннего диаметра оболочки. Пластической деформации сердечника не наблюдалось, поэтому в данном проходе произошло чрезмерное утонение стенок оболочки, что и привело к ее разрыву.

На рис. 5 показан разрыв оболочки при волочении композита по схеме: мягкая оболочка и сердечник из 61 волокна титана. Видно, что края разрыва неровные, поверхность разрыва также скошена в направлении наружной поверхности. Разрыв происхо-

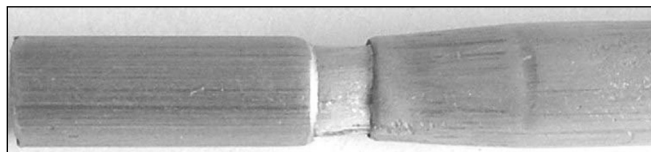


Рис. 4. Разрыв оболочки композитной проволоки с моносердечником Cu–Al

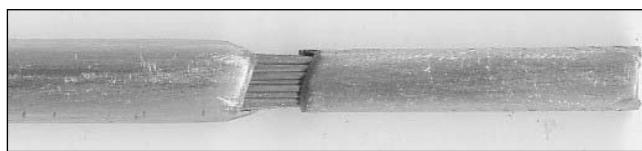


Рис. 5. Разрыв оболочки композитной проволоки Cu–Ti
Сердечник – 61 волокно начальным диаметром 0,5 мм



Рис. 6. Обрыв композитной проволоки Cu–Ti
Сердечник – 7 волокон начальным диаметром 1,9 мм

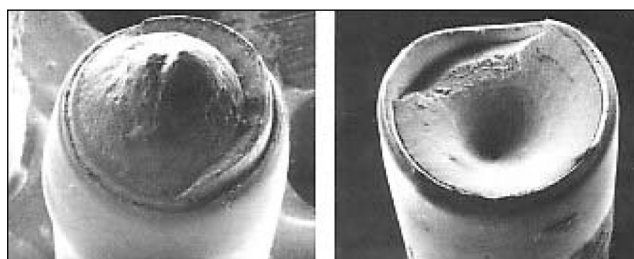


Рис. 7. Обрыв композитной проволоки типа «конус»–«чашка»

дит на стадии начальных проходов, когда заканчиваются уплотнение волокон сердечника и устранение всех пустот и зазоров, а пластическая деформация волокон сердечника еще не начинается. Сцепление наружных волокон сердечника с внутренней поверхностью оболочки недостаточное, полного скольжения оболочки относительно сердечника не происходит. Удлинение оболочки при отсутствии пластического течения волокон сердечника и приводит к разрыву мягкой оболочки.

Интерес представляет полное разрушение композитной проволоки с многоволоконным сердечником при волочении (рис. 6). Края медной оболочки неровные, удлинения волокон сердечника после обрыва неодинаковые — наибольшее имеет центральное волокно, увеличения периферийных волокон значительно различны. Пластичность волокон во 2-м проходе после отжига высокая. Форма очага разрушения каждого волокна имеет вид чашки и конуса — типичный вид такого разрушения при волочении биметаллической проволоки представлен на рис. 7 [4].

ВЫВОДЫ

1. Метод пакетного волочения композитных осесимметричных изделий из разнородных материалов позволяет получать изделия с заданными физическими и механическими свойствами.

2. Сплошное равномерное и пропорциональное течение компонентов композитного изделия реализуется при волочении только после устранения всех технологических зазоров и пустот, образующихся при изготовлении сборок композитного изделия.

3. Процесс волочения композитных изделий определяется углом рабочего конуса волокна, величиной обжатия сечения за проход, условиями трения в зоне деформации и напряжением пластического течения компонентов биметаллического изделия.

4. Использование в качестве многоволоконного сердечника мягких металлов (таких, как медь, алюминий, олово и др.) приводит при волочении, даже при небольших суммарных обжатиях ($\leq 40\%$), к получению сплошных моносердечников. Можно предположить, что из-за наличия напряжений сжатия в волоке происходит холодная сварка волокон между собой, и многоволоконный сердечник становится моносердечником.

5. Многоволоконный сердечник из титана, несмотря на его склонность к холодному свариванию, требует большей суммарной деформации волочением ($\sim 65\%$) для полного схватывания отдельных волокон.

6. Безокислительный отжиг обеспечивает более прочное сцепление граничных поверхностей однородных и разнородных компонентов биметаллической проволоки при волочении.

7. Экспериментальным путем установлено, что после безокислительного отжига при волочении всех исследуемых композитных изделий реализуется схема сплошного пропорционального и равномерного течения компонентов изделия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Avitzur B., Wu R., Talbert S., Chou Y.T. // ASME J. Eng. Ind. 1986. Vol. 108. P. 133.
2. Seet H.L., Li X.P., Lee K.S., Liu L.Q. // J. Mater. Process. Technol. 2007. Vol. 192—193. P. 350.
3. Белошенко В.А., Варюхин В.Н., Дмитренко В.Ю. // Журн. техн. физики. 2009. Т. 79, вып. 12. С. 68.
4. Menge R., Grofl E., Hunal G. // WIRE. 1992. Vol. 42, № 6. P. 517.

УДК 621.777

ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ ПРЕССОВАНИИ ТРИМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ЗАГОТОВКИ

© 2014 г. Г.Л. Колмогоров, Н.А. Кошелева, Т.В. Чернова

Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ)

Статья поступила в редакцию 06.08.2012 г., подписана в печать 10.09.2013 г.

Предложена методика определения оптимальных углов технологического инструмента при прессовании триметаллической заготовки. В основу оптимизации положено напряжение прессования, обеспечивающее минимальные энергозатраты при прессовании.

Ключевые слова: триметаллическая заготовка, прессование, оптимизация, минимизация, угол конусности, прессовый инструмент.

Колмогоров Г.Л. – докт. техн. наук, проф., зав. кафедрой динамики и прочности машин ПНИПУ (614013, г. Пермь, ул. Профессора Поздеева, 13). Тел.: (342) 239-13-40. E-mail: dpm@pstu.ru.

Кошелева Н.А. – аспирант этой кафедры. E-mail: nataly.kosheleva@gmail.ru.

Чернова Т.В. – канд. техн. наук, доцент этой кафедры. E-mail: dpm@pstu.ru.