

*В.В. Драгобецкий, д.т.н., профессор,*

*Е.А. Наумова, инженер,*

*А.В. Воронин, соискатель,*

*Р.Г. Пузырь, к.т.н., доцент*

*Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского*

## **РАСШИРЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРОЦЕССОВ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК**

*Рассмотрены методы усовершенствования процессов деформирования слоистых заготовок. Основные направления повышения деформируемости заготовок связаны с выравниванием механических свойств компонент, управлением контактным трением и характером нагружения. Выявлена и представлена наиболее рациональные схемы сварки взрывом заготовок в дальнейшем подвергаемых формоизменению.*

**Ключевые слова:** *биметалл, сварка взрывом, штамповка, формоизменение, трение, деформируемость*

**Вступление.** В решении проблем ресурсосбережения и расширения технологических возможностей процессов обработки давлением важная роль принадлежит производству слоистых металлических композиций. Их применение является одним из основных резервов экономии дорогостоящих и дефицитных металлов и сплавов. Обработка давлением и взрывное плакирование является главным производителем слоистых заготовок для деталей современных отраслей промышленности. Применение прогрессивных формообразующих технологий, прокатки и сварки взрывом основанных на пластическом деформировании слоистых композиций позволяет получать штампованные детали и полуфабрикаты с минимальным отходом металла, с комплексом физико-механических свойств, недостижимых в монометаллах. При этом осуществляется экономия черных и цветных металлов и существенно изменяется технологическая деформируемость заготовок.

Обзор последних источников исследований и публикаций. Теория обработки давлением слоистых, в том числе и неоднородных сред находится еще на начальной стадии своего развития [1]. Известно [1,2,3], что для решения любой задачи пластического деформирования необходимо и достаточно задать связь между напряжениями и деформациями при линейной схеме напряженного состояния. Особенности, закономерности и неприемлемость предпосылок, на основании которых строились модели пластической деформации слоистой среды, раскрыты Г.Э.Аркулисом [1] и в общих чертах сводится к следующему: деформации неравномерно распределены по объему слоистой заготовки; деформация происходит с уменьшением объема активно деформируемого металла и вытеснения наиболее пластичного компонента.

**Выделение нерешенные ранее частей общей проблемы.** Вопросы повышения деформируемости и интенсификации процесса формоизменения биметаллических заготовок практически не рассмотрены и являются нерешенными в настоящее время.

**Постановка задачи.** Основной целью исследования является выявление методов и путей повышения деформируемости биметаллических заготовок и управления пластическим течением многослоя. Выбор и экспериментальное обоснование наиболее приемлемого варианта слоистой заготовки.

### **Основной материал и результаты.**

Для технологических процессов штамповки тонколистовых панелей, калибровки слоистых листовых заготовок, проката тонкого полиметаллического листа, штамповки

слоистых заготовок малой кривизны и т.д., повышение технологической деформируемости, в основном, сводится к выравниванию механических характеристик компонент слоистой заготовки. Кроме того, в процессах получения тонколистовых биметаллических заготовок методами прокатки или сварки взрывом предварительное выравнивание механических характеристик способствует повышению прочности зоны соединения. Выравнивание механических характеристик компонент может быть достигнуто предварительным упрочнением методами пластического деформирования или термомеханической обработкой компонент слоистой заготовки с более высокими показателями пластичности. При этом предпочтение следует отдавать процессу взрывного упрочнения. В этом случае глубина упрочняемого достигает 40 мм и более, т.е. на всю глубину применяемых в листовой штамповке заготовок. Выравнивание пластических свойств биметаллических заготовок можно достигнуть следующим образом. На поверхность более пластичного металла, а он, как правило, обладает и меньшей акустической жесткостью, необходимо установить дополнительную пластину с большей акустической жесткостью, примерно соответствующей акустической жесткости менее пластичного слоя. Упрочнение взрывом производится через дополнительную пластину. В этом случае ударная волна, возникающая при ударе о верхний (более пластичный) слой частично отражается от нижнего (менее пластичного) слоя в виде вторичной волны сжатия. Происходит многократное отражение ударной волны между верхней дополнительной пластиной и нижним слоем биметалла. Многократное отражение приводит к более интенсивному упрочнению при одинаковом уровне напряжений по сравнению с однократным [4]. При этом в материал с большей акустической жесткостью разупрочняется, что благоприятно сказывается на процессе последующего формоизменения.

Благоприятно сказывается на пластичную деформацию слоистых заготовок предварительная перед пластическим деформированием взрывотермическая обработка. Последняя представляет собой сочетание импульсной и термической обработки. Процесс взрывного деформационного упрочнения может производиться перед и после термической обработки. В первом случае импульсное механическое деформирование заготовки при незначительных остаточных деформациях приводит к созданию в металле дефектов кристаллической решетки, заметно влияющей на кинетику образования новых фаз при последующей термообработке. Импульсное нагружение интенсифицирует процесс зарождения и движения дефектов кристаллической решетки и приводит к возникновению большого количества микроочагов пластической деформации. Сочетание импульсного упрочнения с последующим рекристаллизационным нагревом приводит к измельчению зерна без макродеформации. Взрыво-термическая обработка повышает сопротивляемость металлов распространению трещин в условиях статического и динамического нагружения, при одновременном росте прочности и пластичности, связанной с возрастающей суммарной степенью деформации множественным скольжением. Проведены эксперименты по взрыво-термической обработке мартенсито-стареющей стали.

С этой целью образцы из стали ВНС-17 деформировались взрывом. Испытуемый образец устанавливался с зазором  $(0,5 \div 1) \cdot 10^{-3}$  м параллельно подложке. Над образцом помещалась передающая среда и слой взрывчатого вещества с электродетонатором. Выбранная форма заряда и его расположение обеспечивали импульсную нагрузку всей поверхности образца от одного конца до другого.

Условия экспериментов представлены в таблице 1. Полученные образцы испытывались на ударную вязкость с надрезом по Шарпи в ИЭС им. О.Е.Патона. При этих испытаниях образец представляет собой брус квадратного сечения  $(10 \times 4,5) \cdot 10^{-3}$  м, на котором поперек одной грани сделан надрез с раствором  $45^\circ$ .

Образец опирается обоими концами на опоры, и маятник массой 27 кг со скоростью 5,3 м/с ударяет по середине противоположной надрезу стороны. При разрушении образца измеряют поглощенную энергию. Результаты испытаний также представлены в таблице 1.

**Таблица 1. Изменение ударной вязкости стали ВНС17 после взрывного нагружения**

№ п/п	Материал образца	Передающая среда	Масса заряда ВВ (кг)	Форма заряда	Ударная вязкость Дж/м <sup>2</sup>	Энергия, поглощенная образцом
1.	ВНС-17	1.Пористая резина = $6 \cdot 10^{-3}$ м 2.Резина = $10 \cdot 10^{-3}$ м 3.Пористая резина = $6 \cdot 10^{-3}$ м 4.Пенопласт = $6 \cdot 10^{-3}$ м	0,1	Плоский, толщина слоя $H=10 \cdot 10^{-3}$ м	$87 \cdot 10^{-4} \div 72 \cdot 10^{-4}$	0,2-0,3
2.	ВНС-17	1.Пористая резина = $6 \cdot 10^{-3}$ м 2.Пенопласт = $6 \cdot 10^{-3}$ м 3.Вода = $20 \cdot 10^{-3}$ м 4. Пенопласт = $6 \cdot 10^{-3}$ м	0,1	-	$98 \cdot 10^{-4} \div 87 \cdot 10^{-4}$	0,24-0,36
3.	ВНС-17	1.Пористая резина = $6 \cdot 10^{-3}$ м 2. Пенопласт = $6 \cdot 10^{-3}$ м	-	-	$103 \cdot 10^{-4} \div 94 \cdot 10^{-4}$	0,26-0,38
4.	ВНС-17	1. Пенопласт = $6 \cdot 10^{-3}$ м	-	-	$81 \cdot 10^{-4} \div 72 \cdot 10^{-4}$	0,2-0,3

Проведенные испытания показали, что способность материалов противостоять влиянию концентраторов напряжений (трещин) после импульсного нагружения достаточно высокая, и даже превышает в 1,5÷1,9 раза поглощенную энергию исходных состаренных образцов. Ударная вязкость состаренных образцов составляет  $(63 \div 68) \cdot 10^{-4}$  Дж·м<sup>-2</sup>.

Повышение равномерности пластического течения слоистых материалов в условиях взаимодействия поверхностей листового биметалла с деформирующей и формообразующей поверхностью инструмента достигается путем управления напряжениями контактного трения. Регулирование контактного взаимодействия сводится к торможению более пластичных компонент и активации течения компонент с большим сопротивлением пластическому деформированию. В условиях плоского и объемного напряженного состояния различие механических свойств слоев в более существенной мере сказывается на характере пластического течения слоистого металла. Вероятно, наиболее целесообразно изучать процесс формообразования слоистой заготовки на примере процесса глубокой вытяжки полых слоистых заготовок. Известно [2], что отдельные участки заготовки при вытяжке находятся в разных условиях нагружения. Для полого цилиндра находится в плоско-напряженном и объемно-деформированном состоянии. Считается, что цилиндрическая часть полого тела, находящаяся в зазоре между матрицей и пуансоном, находится в линейно-напряженном и объемно-деформированном состоянии. Часть заготовки под прижимным кольцом находится в объемно-напряженном и объемно-деформированном состоянии, т.е. в процессе вытяжки полых слоистых заготовок наблюдается процесс пластического течения в условиях линейного, плоского и объемного напряженных состояний.

Были проведены экспериментальные исследования по вытяжке биметаллических заготовок, у которых  $A_{ST} \gg A_{SM}$ , где  $A_{ST}$  и  $A_{SM}$  – пределы текучести твердой и мягкой компонент биметалла. Эти биметаллы ВТ 1-0 + сталь ст.3, АД 1-0 + сталь ст. 3. Различие механических свойств металлов слоев,, а также условий трения между контактными поверхностями штампа и биметаллических заготовок, привело к развитию неравномерности деформаций слоев по высоте.

Мягкий слой при коэффициентах вытяжки, превышающих 1,40-1,42, мягкий слой тормозит течение биметалла. Это отрицательно сказывается на процессе вытяжки под прижимным кольцом и благоприятно для данной части заготовки, т.е. пластичный слой препятствует образованию разрывов данной части заготовки. В целом анализ профиля отштампованного биметалла свидетельствует о следующем:

- мягкий слой (титан, алюминий) в зоне прижима и перетяжного ребра деформируется интенсивнее слоя стали;

- в зоне округления пуансона в мягком слое образуется утолщение, в твердом – более интенсивное уплотнение.

Следует учитывать, что при формоизменении деформирующая нагрузка вызывает пластическое течение менее пластичного компонента, а более пластичный находится в условиях интенсивного нагружения. Это приводит в ряде случаев к прилипанию более пластичных компонент к поверхности инструмента даже при наличии смазок. Предотвратить это явление при вытяжке удастся при подводе смазки в полость формируемой заготовки и под прижимное кольцо.

Важнейшими показателями качества слоистых металлических композиций является прочность и сплошность соединения. Наиболее достоверно оцениваемые механическими испытаниями. Наиболее распространенным видом испытаний на заданную пластическую деформацию являются испытания на изгиб. Пластическая деформация характеризуется углом изгиба до образования первой трещины в растянутой зоне, до параллельности сторон и до соприкосновения сторон. Испытание проводились на образцах из слоистой композиции (сталь 20+медь 2Р+латунь 60).

Проведено сопоставление предельных углов сгиба до образования первой трещины монолитного материала (стали, меди и латуни) и слоистого композита (см. табл.2) Для сопоставимости результатов испытаний трехслойного образца монолитные заготовки подвергались взрывному нагружению по схеме и параметрам, соответствующим процессу сварки взрывом. Образование сварного соединения предотвращали путем введения в межслойный сварочный зазор слоя промасленной бумаги.

**Таблица 2. Данные по изгибу слоистой заготовки и компонент**

Материал	Угол гiba до образования первой трещины	До соприкосновения сторон
Триметалл	не образуется	Трещин не образуется
Медь М2Р	нет	то же
Сталь 20	76	образование трещин
Латунь Л60	нет	трещин не образуется

Испытания свидетельствуют о повышении деформируемости слоистого металла по сравнению с монолитным.

Находят применение испытания на изгиб с разгибом, при котором образцы загибают вокруг оправки диаметром, равным удвоенной толщине листа на угол 45, 60, 90 и 120°С, а также испытания на разгиб до появления расслоения и испытания на перегиб. Последние служат для определения способности металла выдержать заданную пластическую деформацию, характеризуемую числом перегибов.

К испытаниям, определяющим способность металлов выдерживать заданную пластическую деформацию, относят и испытания на скручивание (ГОСТ 1579-80).

Испытанию подвергались образцы из композиций титан ВТ-1-0 + медь М2Р (параметры сварки  $r=1,0$ ;  $h=\delta_{Ti}$ ; ВВ – аммиачная селитра + алюминий 1:1) ВТ 1-0+АД 1-0 ( $r=1,0$   $h=1,2\Gamma_{Ti}$ ; ВВ 1:1); М2Р+АД1 ( $r=1,5$   $h=\delta_{ш}$ ; ВВ 3:1) и др.

Образцы из биметалла (нержавеющая сталь Х18Н10Т + медь М2Р) испытывали на изгиб вовнутрь плакирующим слоем (медью) вплоть до разрушения. Размер образцов 3+5x120x8. Отслоений в биметалле не наблюдалось. До и после испытаний определяли изменение микротвердости и оценивали напряженное состояние биметалла при изгибе. На образец наносили параллельные риски и наблюдали их искажение, связанное с действием касательных напряжений. Аналогичные испытания проводились для композиции Сталь 20+АД 1-0 + АМг6 размером 4+4+20x15x120 плакирующим слоем вовнутрь до полного

разрушения. В этом случае наблюдалось отслоение в межслойной зоне. Площадь отслоений не превышала 50% и находится в пределах допуска.

Результаты испытаний свидетельствуют о высокой деформируемости полученных сваркой взрывом композиций и соответствуют требованиям, задаваемым нормативно-технической документацией, определяющей способность композитов выдержать заданную пластическую деформацию.

Большие возможности для управления процессом формоизменения слоистых заготовок имеют процессы импульсного нагружения, при которых возникают волны напряжений (возмущений). Распространяющиеся в слоистой заготовке волны напряжений образуют расширяющиеся с течением времени области возмущений. Волны напряжений в области возмущений подразделяют на первичные, связанные с прохождением волны, и вторичные волны разгрузки, и отраженные последние всегда находятся внутри области возмущений и являются областями с начальными напряжениями и деформациями. Волна нагрузки образует вторичную область возмущений, распространяющуюся внутри области возмущений нагрузки. При выходе волны напряжений на границу раздела слоев или поверхность биметалла и при взаимодействии волн напряжений в слоях биметалла возникает явление отражения.

В процессах импульсного деформирования явления разгрузки и нагрузки могут являться мощным инструментом для управления процессом формоизменения и активизации пластического течения материалов с более высоким сопротивлением пластическому деформированию. Последнее можно осуществить, используя явление взаимодействия волны разгрузки с отраженной волной от границы с более пластичным материалом с меньшей акустической жесткостью, что приводит к интенсивному росту растягивающих напряжений в менее пластичном материале.

В целом распределение импульсной нагрузки в значительной степени зависит от диссипативных свойств компонент слоистой заготовки, их механических свойств, акустической жесткости и геометрических размеров. При определении напряженно-деформированного состояния следует учитывать инерционные напряжения, зависящие от массы компонент и напряжения, связанные с давлением отраженной волны давления.

В процессах импульсного формоизменения, в частности, при гидровзрывной штамповке, наступление пластического течения компонент слоистой заготовки наступает практически одновременно. Параметры внешнего нагружения соответствует возникновению пластических волн нагрузки в слое с большим динамическим пределом текучести. Кроме того, высокоскоростная деформация по разному влияет на степень упрочнения компонент биметалла. В промышленности наиболее широко применяются следующие биметаллические композиции ст.3+08X12Н10Т, М1+08КП, АД 1-0+12Х 18Н10Т, 08КП+БрОЦС 4-4-1, М1+12Х18Н10Г и т.п. Более пластичные компоненты этих биметаллов при высокоскоростной деформации склонны к более высокой степени упрочнения.

Отношение динамических пределов текучести  $A_T^L/A_T^{CT}$  для стали ст. 3 равно 4,1; М1-2,9; стали 12Х18Н10Т-1,22 [5]. Это способствует выравниваю пластических свойств компонент биметалла и более равномерному распределению деформаций по объему заготовки.

В процессах гидровзрывной штамповки роль деформирующего инструмента выполняют ударные волны и гидропоток, что исключает контактное взаимодействие с деформирующим инструментом и тормозящее действие более пластичного компонента. А в процессах безматричной штамповки и близких к ним трение исключается по всем поверхностям. Процесс высокоскоростной деформации протекает более устойчиво, а это расширяет диапазон штампуемых биметаллических заготовок с применением процесса бесприжимной вытяжки и сводит на нет силы трения между поверхностью прижимного кольца и более пластичной компоненты.

В процессах гидровзрывной штамповки возможно одновременно активизировать пластическое течение более труднодеформируемого компонента и упрочнение пластичного. При реверсивной штамповке биметалла, когда поверхность более пластичного компонента контактирует с обтяжным пуансоном, а внешняя нагрузка действует со стороны твердого слоя, создаются условия для многократного упрочнения более мягкой компоненты (см. ранее). Отраженная волна от более пластичной компоненты, имеющей и меньшую акустическую жесткость, является волной растяжения и усиливает деформацию менее пластичной компоненты.

Среди возможных вариантов изготовления биметаллических заготовок выбрана схема с нависанием, полученным при помощи дополнительных пластин, отлетающих при соударении (приставное фальшнависание), либо зона нависания содержит ослабление (V-образные канавки, риски, углубления).

Данные эксперименты по осесимметричной вытяжки безприжимной штамповки и гибки показали, что заготовки, полученные по этой схеме не имеют расслоений.

**Выводы.** Таким образом, повышение деформируемости биметаллических заготовок достигается путем выравнивания механических свойств компонент и управления силами контактного трения между поверхностями заготовки и инструмента. Наиболее эффективное управление пластическим течением многослойа достигается в процессах импульсного деформирования. Наиболее эффективной схемой получения биметаллических заготовок сваркой взрывом является схема с боковым нависанием.

#### *Литература*

1. Аркулис, Г. Э. Теория пластичности [Текст] / Г. Э. Аркулис, В. Г. Дорогобид // Учебное пособие для вузов. – М.: Металлургия, 1987. – 352 с.

2. Качанов, Л. М. Основы теории пластичности [Текст] / Л. М. Качанов // 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Наука, 1969. – 420 с.

3. Джонсон, У. Теория пластичности для инженеров [Текст] / У. Джонсон, П. Меллон // Пер. с англ. – М.: Машиностроение, 1979. – 568 с.

4. Драгобецкий, В. В. Взрывотермическое упрочнение в процессах импульсной обработки [Текст] / В. В. Драгобецкий // В сб. 2-го Международного симпозиума «Оборудование и технология термической обработки металлов и сплавов в машиностроении» (ч.1, 2001). – Харьков: ИПЦ «Контракт» 2001. – 228 с.

5. Драгобецкий В. В. Оценка штампуемости слоистых заготовок [Текст] / В. В. Драгобецкий // Проблемы создания новых машин и технологий. Выпуск 1/2001 (10) – С. 396-398.

© Драгобецкий В.В., Наумова О.О., Воронін О.В., Пузир Р.Г.,

УДК 669.017.621.7.044.2

*Драгобецкий В.В., д.т.н., профессор,*

*Наумова О.О., инженер,*

*Воронін О.В., пошукач,*

*Пузир Р.Г., к.т.н., доцент*

*Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського*

### **РОЗШИРЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ МОЖЛИВОСТЕЙ ПРОЦЕСІВ ФОРМОЗМІНИ БІМЕТАЛЕВИХ ЗАГОТОВОК**

*Розглянуто методи удосконалення процесів деформування шаруватих заготовок. Основні напрями підвищення заготовок, що деформуються та пов'язані з вирівнюванням механічних властивостей компонент, управлінням контактним тертям і характером навантажування. Виявлено і представлено найбільш раціональні схеми зварювання вибухом заготовок надалі піддаються формозміні. Надані результати експериментальних*

досліджень щодо зміни ударної в'язкості мартенситно-старіючої сталі після вибухового навантаження, згину шаруватих заготовок, їх витяжки та безприжному штампуванні.

**Ключові слова:** біметал, зварювання вибухом, штамповка, формозміну, тертя, деформованість

UDK 669.017.621.7.044.2

*Dragobetsky V., Ph.D*

*Naumova O., engineer,*

*Voronin O., search engine,*

*Puzyr R., Ph.D*

*Kremenchuk Mykhailo Ostrohradsky National University*

### **EXPANSION OF TECHNOLOGICAL POSSIBILITIES OF BIMETALLIC BLANKS FORMING**

*Methods of deformability improvement of multilayer blanks have been considered. Deformability increase of multilayer blanks is predetermined by component mechanical characteristics leveling, friction control and loading character. The most rational charts of the explosive welding of the billets further subjected to forming are found and presented.*

**Key words:** *bimetal, explosive welding, punching, forming, friction, deformability.*