

УДК 621.7.044

ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ МАТЕРИАЛОВ, ОБЛАДАЮЩИХ РАЗЛИЧНЫМИ МЕХАНИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ

Т. В. Гайкова, В. В. Драгобецкий, Р. Г. Пузырь

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского

ул. Первомайская, 20, м. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: vldrag@polytech.poltava.ua

Преимущество использования материалов с особыми свойствами, к которым можно отнести слоистые металлические композиции, заключается в повышении надежности и долговечности изделий, экономии более дорогих материалов и снижении массы отдельных деталей, что приводит к значительному сокращению расходов при эксплуатации оборудования. Надежность и безопасность работы любого вида машин напрямую зависит от материалов, из которых они изготовлены. Применение слоистых композиций дает возможность улучшить функциональные характеристики различного рода механизмов за счет повышения механических характеристик в местах наибольшей нагрузки и облегчить ненагруженные зоны. Показано, что при пластической деформации слоистых композиций неравномерность деформации зависит от порядка укладки составляющих в слоистой заготовке, и прочная связь между слоями, препятствующая взаимному смещению частиц металла на границе раздела слоев, оказывает существенное влияние на характер деформированного состояния.

Ключевые слова: слоистые металлы, деформация, биметалл, напряжения.

ПЛАСТИЧНА ДЕФОРМАЦІЯ МАТЕРІАЛІВ З РІЗНИМИ МЕХАНІЧНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ

Т. В. Гайкова, В. В. Драгобецький, Р. Г. Пузир

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: vldrag@polytech.poltava.ua

Перевага використання матеріалів з особливими властивостями, до яких можна віднести шаруваті метали композиції, полягає у підвищенні надійності і довговічності виробів, економії дорогих матеріалів і зниженні маси окремих деталей, що приводить до значного скорочення витрат при експлуатації устаткування. Надійність і безпека роботи будь-якого виду машин безпосередньо залежить від матеріалів, з яких вони виготовлені. Застосування шаруватих композицій дає можливість поліпшити функціональні характеристики різного роду механізмів за рахунок підвищення механічних характеристик в місцях найбільшого навантаження і полегшити ненавантажені зони. Показано, що при пластичній деформації шаруватих композицій нерівномірність деформації залежить від порядку укладання складових у заготовці та міцний зв'язок між шарами, перешкоджає взаємному зсуву частинок металу на межі розділу шарів, здійснює істотний вплив на характер деформованого стану.

Ключові слова: шаруваті метали, деформация, биметалл, напруження.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Особая роль среди новых материалов со специальными свойствами принадлежит слоистым металлическим композициям. Такие материалы могут быть изготовлены соединением разнородных металлов в монолитную композицию, сохраняющую надежную связь составляющих при дальнейшей технологической обработке и в условиях эксплуатации.

Применение слоистых металлов позволяет не только повысить надежность и долговечность большого класса деталей и оборудования, но и значительно сократить расходы на их изготовление в результате экономии дорогостоящих цветных металлов. Кроме того, использование слоистых композиций способствует разработке более совершенных конструкций машин, приборов, аппаратов [1].

Использование слоистых металлов позволяет существенно повысить эффективность производства широкого класса деталей и оборудования для предприятий химической, нефтяной, сельскохозяйственной, транспортной, энергетической и других отраслей машиностроения. К потребителям слоистых композиций относятся также приборостроение и радиоэлектроника, инструментальная промышленность.

Все производимые в настоящее время слоистые металлы по назначению можно подразделить на следующие виды: коррозионностойкие, антифрикционные, электротехнические (проводниковые и

контактные), инструментальные, износостойкие, тербиметаллы, композиции для бытовых изделий. В сортамент изделий из слоистых металлов входят листы, ленты, прутки, трубы, фасонные профили [1].

Прочность соединения слоев, как правило, приближается к прочности одного из компонентов композиции, а иногда превышает ее. Обычно прочность соединения слоев заметно выше допустимой по стандарту ($\sigma_s = 150$ МПа) [2].

Другие важные свойства слоистых металлов: теплопроводность и технологичность (способность к сварке, гибке, штамповке). Двухслойная сталь имеет более высокую теплопроводность по сравнению с монолитной коррозионностойкой. Композиции с плакирующим слоем из коррозионностойкой стали имеют теплопроводность, которая незначительно уступает теплопроводности основного слоя и в 2–3 раза выше теплопроводности коррозионностойкой стали [1]. Это обстоятельство особенно важно при изготовлении теплообменной аппаратуры, т.к. улучшает ее эксплуатационные характеристики.

Из износостойких материалов наибольшее распространение получила трехслойная композиция сталь 60+сталь 15+сталь 60 для отвалов плугов с соотношением толщин слоев 1:1:1. Эту сталь выпускают в виде листов сечением 7 x 385 мм по ГОСТ 6765–75 длиной 1500–3100 мм [2].

В качестве износостойких композиций могут

быть использованы двухслойные и трехслойные листы общей толщиной 2–15 мм с относительной толщиной твердого слоя 10–50 %. В качестве основы применяют стали с 0,06–0,50 % С, а для твердого износостойкого плакирующего слоя – как высокоуглеродистые инструментальные стали с 0,60–1,30 % С, так и различные легированные износостойкие инструментальные и карбидные стали типа 6ХС, 85ХФ, 3Х5ВФ, 9Х5В, 65Г, Х6Ф1, Х1Ш.

Возможно применение более толстых биметаллических листов толщиной до 50–100 мм, главным образом, для горнодобывающей промышленности [1]. Перспективно также использование фасонных биметаллов в виде клиновых профилей для изготовления различных лезвий в сельскохозяйственном производстве и инструментальной промышленности или в виде круглых и более сложных профилей (зубчатых, пустотелых), в качестве заготовок для различных износостойких осей, валиков, фрез и т.д. Из инструментальных биметаллов делают также ножи для строгания и резки древесины, бумагорезательные и лущильные ножи.

Целью работы является анализ существующей области применения биметаллов и исследование возможности пластической деформации слоистых композиций.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. Большие перспективы имеет применение слоистых металлов для транспортных устройств в виде желобов, черпаков, используемых в горнодобывающей промышленности, тепловой энергетике, легкой и пищевой промышленности.

При пластической деформации в слоях композиции возникают зоны с разнозначными внутренними напряжениями, которые могут привести к образованию складок, гофр и даже разрывов и расслоений на готовом изделии. При обработке в горячем состоянии проявляется различие в коэффициентах линейного расширения составляющих, которое также может привести к короблению и расслоению изделия [2].

Слоистые металлы, полученные методом прокатки, обладают также существенной анизотропией механических свойств вдоль и поперек направления прокатки. Например, относительное удлинение и сужение образцов из биметаллического листа композиции алюминий Д16 + титан ВТ1–0, вырезанных в поперечном направлении, в 1,5–2 раза выше, чем образцов, вырезанных в продольном направлении [1]. Поэтому при создании технологических процессов обработки слоистых металлов давлением необходимо знать их механические свойства, а также влияние термомеханических параметров обработки на прочность соединения составляющих.

При изготовлении многих деталей из слоистых металлов первой заготовительной операцией является правка, которую обычно осуществляют в валковых правильных машинах. Эта операция не вызывает затруднений и проводится по режимам, близким к режимам правки однородных металлов. В

случаях использования ручных операций правки необходимо принимать меры по предотвращению забоин на плакирующем слое, например, с помощью применения прокладок из пластичных металлов (меди или алюминия).

Наиболее сложная операция обработки слоистых металлов давлением – вытяжка, широко применяемая для получения многих деталей (днищ, стаканов, панелей и т.п.). Исследование процесса вытяжки слоистых металлов широкого класса показало их высокие пластические свойства и способность подвергаться деформации как в нагретом, так и в холодном состоянии [2]. При вытяжке необходимо обеспечивать меры по предохранению плакирующего слоя от царапин вмятин, забоин. Рекомендуют защищать плакирующий слой предохранительными прокладками из бумаги, картона, тонколистового мягкого металла (меди, алюминия).

Исследование способности слоистых заготовок, состоящих из листов алюминия и латуни различной твердости к глубокой вытяжке с помощью пуансонов с плоской и полусферической головками показало [1], что эта их способность определяется соотношением механических свойств составляющих композиции. Рекомендуется для изготовления слоистых композиций использовать составляющие из металлов, обладающих значительно различающимися коэффициентами деформационного упрочнения. При использовании пуансона с полусферической головкой не обнаружено влияние взаимного расположения компонентов биметалла на его способность к вытяжке. В случае же использования пуансона с плоской головкой выбор оптимального сочетания компонентов биметалла имеет большое значение. Если мягкий компонент расположен на наружной стороне, то в качестве внутреннего компонента желательно выбирать твердый металл. Если же внутренний компонент представлен мягким материалом, то наружный слой должен быть мягким. При наружном компоненте из твердого материала для внутреннего желательно выбирать тонкий лист из мягкого и прочного металла.

Некоторые слоистые металлы при определенных условиях проявляют лучшую способность к вытяжке, чем каждый из составляющих компонентов. Это обстоятельство можно использовать как средство для улучшения способности к вытяжке материалов, входящих в данную композицию [3]. Например, тонколистовой металл (фольга), плохо поддающийся вытяжке, при плакировании его другим тонколистовым металлом приобретает способность к глубокой вытяжке без образования гофров. Кроме того, такой двухслойный материал имеет высокие прочностные свойства.

Силы трения на поверхности контакта заготовки и инструмента существенно влияют на распределение деформаций по объему слоистой заготовки. Известно, что при обработке металлов давлением силы контактного трения могут быть активными, т.е. способствующими деформации приконтактных слоев металла, или реактивными, т.е. затрудняющими ее.

Влияние сил контактного трения определяется не только их направлением, но и соотношением толщин слоев, т.е. областью действия сил трения в поперечном сечении заготовки, а также параметрами очага деформации (отношением длины очага деформации к толщине биметалла). Изменяя условия контактного трения при формоизменении слоистых металлов, можно регулировать распределение деформаций между слоями.

Рассмотрим сначала одноосное сжатие пакета, набранного из пластин мягкого и более твердого материала. Такое тело назовем бинарной системой [3]. При отсутствии внешнего и межслойного трения и реактивной деформации сначала начнут пластически деформироваться пластины мягкого материала М. Определим при какой степени логарифмической деформации $\ln \frac{h_{0M}}{h_{M,кр}} = h_{M,кр}$ начнут деформироваться пластины твердого материала Т.

Деформация пластин М будет продолжаться до тех пор, пока их текущий предел текучести при сжатии не станет равным начальному пределу текучести при сжатии материала Т, что можно выразить следующим уравнением:

$$P_{0M} + q_M h_{M,кр} = P_{0T}, \quad (1)$$

где θ_M – текущий модуль упрочнения металла М.

Если ввести понятие о модуле начальной неоднородности (гетерогенности) системы, характеризуемом безразмерной величиной

$$y_n = \frac{(P_{0T} - P_{0M})}{q_M}, \quad (2)$$

тогда на основании уравнения (1) $h_{M,кр} = y_n$, т.е. при идеальной осадке многослойных тел критическая степень деформации пластин М равна модулю начальной неоднородности системы.

Поэтому, если $q_M = 0$ (материал М1 не упрочняется), согласно выражению (2) $y_n \rightarrow \infty$ и $h_{M,кр} \rightarrow \infty$. Это значит, что совместная пластическая деформация разных металлов невозможна, так как деформация ступенчатая: сначала весь материал М будет выжат в облой, и только после этого начнется деформация пластин Т.

Из определения логарифмической деформации получаются важные для идеальной осадки соотношения:

$$\frac{h_{0M}}{h_{M,кр}} e^{y_n} = g_{M,кр}, \quad h_{M,кр} = h_{0M} e^{-y_n}. \quad (3)$$

Для совместного деформирования компонентов бинарной системы необходимо равенство их текущих пределов текучести:

$$P_{0M} + q_M h_M = P_{0T} + q_T h_T. \quad (4)$$

Введем понятие «модуль относительного упрочнения бинарной системы», характеризуемый безразмерным коэффициентом $q = \frac{q_T}{q_M}$. Разделив урав-

нение (4) на модуль упрочнения, получим соотношения коэффициентов высотной деформации при одноосном сжатии бинарной системы

$$g_M = g_T^q e^{y_n}, \quad \frac{g_M}{g_{кр}} = g_T^q. \quad (5)$$

Учитывая, что $\ln \frac{g_M}{g_{кр}} = \ln \frac{h_{M,кр}}{h_M} = h_M''$ и

$\ln g_T = h_T$ уравнения (5) получим условие послекритической совместной деформации всех слоев бинарной системы при $q_M = const$

$$h_M'' = h_T q. \quad (6)$$

Правильность этого уравнения подтверждается следующим. Если обжимать многослойное тело из пластин М и Т в таких условиях, чтобы их послекритические модули упрочнения были равны, то модуль относительного упрочнения $q = 1$ и $h_M'' = h_T$ согласно уравнению (6), т.е. послекритические деформации обоих компонентов системы одинаковы и деформация пакета равномерная (разные металлы будут деформироваться как единое целое).

Коэффициент неравномерности деформации компонентов системы χ выражается отношением их степеней деформации. Тогда из уравнений (2) и (6) следует

$$\chi = \frac{h_M}{h_T} = \frac{h_{M,кр} + h_M''}{h_T} = \frac{y_n}{h_T} + q, \quad (7)$$

что позволяет подсчитать общую неравномерность деформации в любой момент сжатия, зная только η_m и механические свойства компонентов системы.

Неравномерность деформации зависит от порядка укладки составляющих в слоистой заготовке (пакет) [1]. Различают симметричные и асимметричные пакеты. В первом порядке укладки слоев твердого (Т) и мягкого (М) металлов может быть следующим: М + Т + М или Т + М + Т, т.е. наружные слои выполнены или из мягкого, или из твердого металла. Асимметричные пакеты состоят из двух слоев – мягкого и твердого.

Как известно [1], при деформации заготовки, составленной из металлов с разными механическими свойствами, в мягких слоях М появляются дополнительные напряжения сжатия, а в твердых Т – растяжения. В приконтактных поверхностях слоев металла в результате взаимодействия с ними валков возникают сжимающие напряжения. Таким образом, мягкий слой заготовки подвергается действию дополнительных сжимающих напряжений, как со стороны твердого слоя, так и со стороны вала. В результате этого деформация мягкого слоя затрудняется, а твердого – облегчается, что приводит к сближению деформации мягкого и твердого слоев, а следовательно, к снижению неравномерности деформации биметалла. Уменьшение толщины мягкой составляющей по отношению к твердой способствует выравниванию послойных деформаций. Таким образом, при прокатке слоистых металлов в асимметричных пакетах с уменьшением в них доли мягкой составляющей сводится к минимуму неравномерность послойной деформации. Так, в работе [4] показано, что при прокатке биметалла Cu + Al при соотношении $H_M/H_m = 0,3$ и параметре очага деформации $1/H_{cp} = 4$ послойные деформации компонентов становятся почти равными.

Если толщины твердого и мягкого слоев близки,

возникает значительная неравномерность деформации. Для ее снижения применяют прокатку в симметричных четырехслойных двойных пакетах, собранных по схеме $M+T+T+M$, соответствующей схеме $M+T+M$. При этом между твердыми слоями помещают разделительный подслой, препятствующий их соединению в процессе прокатки. При прокатке симметричных пакетов схемы $M+T+M$ в мягких слоях в приконтактных поверхностях с валком и твердым слоем возникают дополнительные сжимающие напряжения, а в твердом слое – растягивающие напряжения. Такая схема обеспечивает минимальную неравномерность послойных деформаций.

При прокатке пакетов схемы $T+M+T$ в слоях твердого металла возникает разноименное напряженное состояние: сжатие со стороны валка и растяжение со стороны мягкого слоя. Поэтому, твердые слои в данном случае будут деформироваться в меньшей степени, чем в случае $M+T+M$. Таким образом, неравномерность послойной деформации при прочих равных условиях выше в случае использования схемы $T+M+T$.

Как было сказано выше, при прокатке слоистого металла относительная деформация мягкого слоя ε_m больше относительной деформации твердого слоя ε_t и общей относительной ε :

$$\varepsilon_m > \varepsilon > \varepsilon_t \text{ и } \varepsilon_m/\varepsilon < 1; \varepsilon_m/\varepsilon \geq 1; \varepsilon_t/\varepsilon_m \leq 1.$$

Чем равномернее деформация, тем ближе приведенные отношения к единице. Если известно одно из приведенных отношений, то можно определить деформацию каждого слоя. В общей форме зависимость относительной деформации от основных параметров процесса имеет вид функции

$$e_m / e = j (s_m / s_t; H_m / H_t; 1 / H_{cp}; f; r; j),$$

где H и H_t – начальная толщина биметалла и его

твердого слоя соответственно; σ_t и σ_m – величины, характеризующие сопротивление деформации металлов твердого и мягкого слоев соответственно; $1/H_{cp}$ – параметр очага деформации; ρ – величина, характеризующая трение между слоями; f – коэффициент внешнего трения; φ – параметр, характеризующий расположение слоев в биметаллической заготовке.

ВЫВОД. Область применения слоистых металлов довольно обширная и экономически выгодно применять биметаллы с целью совершенствования оборудования.

Прочная связь между слоями, препятствующая взаимному смещению частиц металла на границе раздела слоев, оказывает существенное влияние на характер деформированного состояния. При этом деформации слоев более равномерны, чем при отсутствии межслойной связи.

Таким образом, при разработке технологического процесса получения изделий из слоистых металлов с предварительным сцеплением слоев необходимо учитывать послойные деформации, их зависимости от параметров процессов формоизменения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Технология слоистых материалов: учебн. пособие / А.Г. Кобелев, И.Н. Потапов, Е.В. Кузнецов. – М.: Металлургия, 1991. – 248 с.
2. Пластическая деформация слоистых композиционных материалов / С.В. Воронов, Д.Г. Девейко // Порошковая металлургия. – 1982. – № 12. – С. 47–70.
3. Теория пластичности: учебн. пособие для вузов / Г.Э. Аркулис, В.Г. Дорогобид. – М.: Металлургия, 1987. – 352 с.
4. Засуха П.Ф. Биметаллический прокат / П.Ф. Засуха, В.Д. Корщиков, Б.О. Бувалов. – М.: Металлургия, 1970. – 263 с.

PLASTIC FLOW OF MATERIALS POSSESSING DIFFERENT MECHANICAL PROPERTIES

T. Gaikova, V. Dragobetskii, R. Puzyr`

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University

vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: vldrag@polytech.poltava.ua

Advantage of the use of such materials with special properties as stratified metallic compositions consists in the increase of reliability and longevity of wares, economy of more expensive materials, and decline of mass of some details, which results in the considerable cutback of spending during exploitation of equipment. Reliability and safety of any machines operating depends directly on their materials, and application of the stratified compositions enables to improve functional curves of different mechanisms due to the increase of mechanical properties in the places of the most loading and to facilitate the unloaded areas. It is shown that during the plastic flow of the stratified compositions the unevenness of deformation depends on the order of piling of constituents in the stratified purveyance, and durable connection between layers, impedimental to mutual displacement of particles of metal on the border of layers, renders substantial influence on character of the deformed state.

Keywords: stratified metals, deformation, bimetal, tensions.

REFERENCES

1. Koblelev A.G. *Technology of laminates: school-book* [Text] / F.G. Koblelev, I.N. Potapov, E.V. Kuznetsov. – M.: Metallurgy. 1991. – 248 p. [in Russian].
2. Voronov S.V. A flowage of composition laminates [Text] / S.V. Voronov, D.G. Deveiko // *Powder-like metallurgy*. – 1982. – № 12. – PP. 47 – 70. [in Russian].
3. Arkulis G.E. Theory of plasticity: school-book for the higher educational establishments [Text] / G.E. Arku-

lis, V.G. Dorogobid. – M.: Metallurgy, 1987. – 352 p. [in Russian].

4. Zasukha P.F. *Bimetallic rent* / P.F. Zasukha, V.D. Korschikov, B.O. Buvalov. – M.: Metallurgy, 1970. – 263 p. [in Russian].

Стаття надійшла 25.06.2012.

Рекомендована до друку
д.т.н., проф. Драгобецьким В.В.

