

DOI: 10.7242/1999-6691/2014.7.4.38

УДК 539.422.52

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАССЛОЕНИЯ ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ БИМЕТАЛЛИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА, ПОЛУЧЕННОГО СВАРКОЙ ВЗРЫВОМ

С.В. Смирнов, И.А. Веретенникова, Д.И. Вичужанин

Институт машиноведения УрО РАН, Екатеринбург, Российская Федерация

Разрушение по границе соединения – один из наиболее типичных видов повреждения слоистых материалов при деформации. В теоретической части работы предложена феноменологическая модель, позволяющая прогнозировать поврежденность и разрушение расслоением при пластической деформации граничного слоя металлического материала, изготовленного сваркой взрывом. Объектом исследования является промежуточный слой, включающий границу соединения разнородных материалов и пограничные зоны. Расслоение рассматривается как процесс возникновения и развития на границе соединения материалов микродефектов сплошности, которые при определенных условиях приводят к образованию межслойных трещин. Разрушение расслоением происходит за счет двух основных механизмов – отрыва и сдвига. Модель учитывает влияние напряженного состояния на предельные деформации, вызывающие расслоение по механизму отрыва и сдвига, накопление поврежденности и разрушение граничного слоя в слоистом металлическом материале. Применение модели на практике основывается на использовании диаграмм предельной пластичности при отрыве и сдвиге граничного слоя. В экспериментальной части работы предложена методика построения таких диаграмм, и с ее помощью получены диаграммы предельной пластичности на отрыв и сдвиг для граничного слоя в биметалле «сталь 08X18H10T – сталь 10». Возможности модели при установлении значений предельных деформаций, при которых осуществимо деформирование без расслоения, продемонстрированы в экспериментах на примере прокатки биметаллической полосы «сталь 08X18H10T – сталь 10». Сравнение расчетных и экспериментальных данных показало, что они практически совпадают, и тем самым подтверждается применимость модели к реальным технологическим процессам.

Ключевые слова: поврежденность, разрушение, феноменологическая модель, многослойные металлические материалы, расслоение, диаграммы предельной пластичности, пластическая деформация, моделирование, прокатка

MODELING OF DELAMINATION IN MULTILAYER METALS PRODUCED BY EXPLOSIVE WELDING UNDER PLASTIC DEFORMATION

S.V. Smirnov, I.A. Veretennikova and D.I. Vichuzhanin

Institute of Engineering Science UB RAS, Yekaterinburg, Russian Federation

Weed damage is one of the typical forms of material damage under deformation. The paper proposes a phenomenological model to predict damage and fracture caused by delamination in multilayer metals produced by explosive welding under plastic deformation. The intermediate layer including a weld joint accomplished in a variety of different metals and boundary zones is the object of our study. It is assumed that the material preserves macroscopic continuity up to the initiation of a lamination crack. Delamination is considered as a process of initiation and development of continuity microdefects which result in interlaminar crack formation. Delaminations form due to some combination of two basic (opening and shear) modes under plastic deformation. The model takes into account the effect of the stress state on ultimate strains causing opening – and shear – modes delaminations, damage accumulation and intermediate layer fracture for multilayer metals. Application of the model is based on the usage of peak plasticity diagrams for opening and shear modes of the intermediate layer. An experimental technique for constructing plasticity diagrams is proposed. Using of this technique, peak plasticity diagrams for opening shear modes of the bimetal intermediate layer of “steel X10 Cr Ni Ti 189 -steel C 10” were plotted. The efficiency of the model for computational experiments is verified during rolling the bimetallic strip of “steel X10 Cr Ni Ti 189 - steel C 10”. A comparison of the calculated and experimental results shows high coincidence, which is indicative of the fact that the proposed fracture model can be used in real manufacturing processes.

Key words: damage, fracture, phenomenological model, multilayer metals, delamination, peak plasticity charts, plastic deformation, modeling, rolling

1. Введение

Анализ тенденций развития современной промышленности свидетельствует о том, что эффективным решением проблемы получения в материалах специфических, часто несовместимых характеристик является разработка и создание композиционных материалов. Слоистая металлическая композиция (слоистый металл) включает два и более слоев двух и более разнородных металлов и обладает новыми качествами, отличными от качеств исходных металлов [1]. Такой материал должен иметь прочные межслойные связи, сохраняющиеся при дальнейшей технологической обработке и в условиях эксплуатации. Основным процессом изготовления слоистых металлических материалов является сварка находящихся в контакте поверхностей, в результате которой возникает прочное сцепление слоев. Такая сварка может быть осуществлена различными методами, среди которых следует выделить сварку взрывом [2, 3]. Работы по изучению структуры и механических свойств металлических многослойных материалов, полученных этим способом, проводятся в течение нескольких десятилетий [4, 5].

К сегодняшнему дню решены многие проблемы, связанные с технологией изготовления подобных материалов [1, 3], показаны пути улучшения их механических свойств, найдены экспериментальные данные, объясняющие различные аспекты строения и управления их свойствами. Большой процент исследований касается воздействия сварной границы на поведение композита в процессе обработки и эксплуатации [2]. Наличие околошовной зоны, образующейся при взрывной обработке за счет деформации, усложняет исследование влияния параметров совместной деформации на изменение толщины и свойств составляющих композит материалов, а также на оценку параметров разрушения самого композита [6]. Расслоение сварной границы является одним из распространенных видов дефектов слоистых металлов и часто считается решающим фактором в вопросе использования многослойного материала в конструкциях [7]. Расслоения могут возникать в местах концентрации напряжений, в зонах скачкообразного изменения толщины материала из-за несовершенств технологии производства композита, при воздействии эксплуатационных нагрузок или при дальнейшей обработке.

Современные теоретические представления механики композитов [8–13 и другие] используются для оценки прочности биметаллов, однако позволяют прогнозировать разрушение зоны соединения металлических материалов при малых упругопластических деформациях, характерных для эксплуатационных нагрузок, но не могут быть применены к процессам с большими пластическими деформациями. Таким образом, в связи с отсутствием точных аналитических решений для оценки прочности и прогнозирования разрушения биметаллов с учетом пространственной неоднородности физико-механических свойств вблизи сварной границы вследствие неконтролируемых локальных пластических деформаций при сварке взрывом, преобладающими методами исследования являются экспериментальные и, в меньшей степени, численные и приближенные аналитические методы [6]. Рядом авторов предложены корреляционные зависимости и расчетные схемы контактного упрочнения, изучено распределение остаточных напряжений [14–19 и другие]. Большинство исследований в данной области посвящено изучению особенностей изготовления биметаллов посредством совместной холодной или горячей деформации, при этом процесс деформирования рассматривается на стадии независимой деформации каждого слоя, когда еще не образовалось прочное соединение слоев композиции и отсутствует совместная деформация. Полученные при этих условиях зависимости с известными оговорками, например заменой межслойных сил трения на касательные напряжения на границах слоев, могут быть употреблены и для анализа процессов деформирования сваренного взрывом композита. Такая замена не всегда приводит к корректным результатам, поскольку не учитывает форму и специфические свойства сварного шва [6]. При разработке инженерных методик расчета величины пластической деформации многослойных тел применяются допущения, упрощающие модель процесса и позволяющие получать аналитические зависимости для оценки влияния его основных параметров на формоизменение и энергосиловые параметры [15].

Прогнозирование разрушения биметаллов, полученных сваркой взрывом, опирается главным образом на экспериментальные исследования, из которых для каждого конкретного материала извлекаются практические рекомендации по его деформированию. Но эти рекомендации не всегда корректны при рассмотрении других биметаллических композиций [6, 20–27 и другие]. Следовательно, актуальным является развитие моделей поведения биметаллов с учетом разрушения элементов структуры и методов решения задач пластического деформирования для различных случаев напряженно-деформированного состояния. Решение подобных задач связано, в первую очередь, с трудностями расчета, сложностью математических моделей. Феноменологический подход дает возможность избегать моделирования сложной геометрии реальных трещин и разрывов в поврежденных структурно-неоднородных средах, а также определения площади поверхности разрушения. В то же время он позволяет все этапы повреждения, включая переход к нестабильной стадии, описывать функциями состояния материала. Многочисленные модели механики поврежденности в рамках феноменологического подхода [28–32 и другие] используются для описания процессов разрушения монолитного материала и составляющих слоистых материалов, но не позволяют оценивать разрушение в зоне соединения. В связи с этим создание моделей, способных по данным вычислительных экспериментов прогнозировать в технологических процессах пластического формоизменения разрушение слоистых металлических материалов путем расслоения, является актуальной.

Цель данной работы заключается в разработке феноменологической модели поврежденности и прогнозирования разрушения слоистого металлического материала, полученного сваркой взрывом, при пластической деформации. Модель должна учитывать влияние напряженного состояния на предельные деформации граничного слоя, вызывающие расслоение по механизму отрыва и сдвига. Демонстрируются возможности ее использования для моделирования расслоения биметаллического листа при прокатке.

2. Модель поврежденности и разрушения граничного слоя при пластической деформации

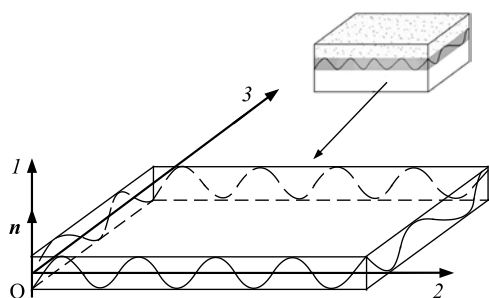


Рис. 1. Элемент граничного слоя со схематично изображенным сварным швом

В слоистых материалах, изготовленных сваркой взрывом, сварной шов характеризуется геометрической неоднородностью профиля (Рис. 1), что является следствием нестабильности на границе раздела материалов деформационных процессов в направлении, перпендикулярном вектору скорости сварки [33]. Под воздействием сварки, с одной стороны, слои в области контакта подвергаются интенсивной деформации, вызывающей возникновение дефектов в их кристаллической структуре и обуславливающей значительное упрочнение каждого из металлов [2]. С другой стороны, компоненты многослойного материала расплавляются и взаимодействуют друг

с другом, образуя в околошовной зоне локальные участки, состоящие из нового вещества, имеющего сложный состав [5] и твердость, обычно превышающую твердость компонентов в исходном состоянии. В результате в окрестности шва рождается особая зона — зона упрочнения.

Исходя из вышесказанного, в качестве объекта исследования, испытывающего деформацию и разрушение, будем рассматривать граничный (промежуточный) слой, включающий границу соединения разнородных материалов и их пограничные зоны (Рис. 1). При этом условимся, что элемент граничного слоя имеет конечные размеры и усредненные механические свойства, отличные от свойств компонентов, а его материал — это однородная упругопластическая среда с изотропным упрочнением, для которой справедливо условие пластичности Мизеса.

Предлагаемая модель относится к классу феноменологических континуальных моделей рассеянного разрушения [34], то есть считается, что материал в процессе деформирования сохраняет свою макроскопическую сплошность вплоть до возникновения трещины расслоения. Предполагаем, что разрушение расслоением есть результат проявления двух основных механизмов — отрыва и сдвига. Расслоение начинается не внезапно, ему предшествует пластическая деформация граничного слоя. По аналогии с моделями, принятыми в механике когезионного разрушения, введем понятие поврежденности [29], характеризующей в данном случае степень использования ресурса пластичности граничного слоя при деформации, когда разрушение происходит по механизму расслоения.

В отличие от сред с изотропными предельными пластическими свойствами, которые фигурируют в скалярных теориях поврежденности, предельная пластичность граничного слоя зависит от механизма деформации и существенно разнится при отрыве и сдвиге. На основании этого изобразим поврежденность как вектор $\omega\{\omega_n, \omega_s\}$ (Рис. 2), а в качестве меры поврежденности ω возьмем длину вектора [34]:

$$\omega = \sqrt{(\omega_n)^2 + (\omega_s)^2}, \quad (1)$$

где ω_n , ω_s — поврежденности при отрыве и сдвиге соответственно; ω_n накоплена за счет деформации

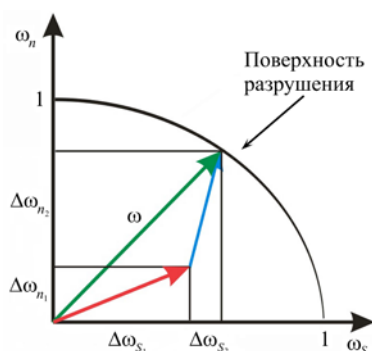


Рис. 2. Графическое представление модели разрушения расслоением при пластической деформации

в направлении нормали к граничному слою, ω_s — за счет деформации сдвига в плоскости граничного слоя. До деформации поврежденность равняется нулю, а в момент макроскопического разрушения — единице.

Примем гипотезу, согласно которой расслоению соответствует достижение вектором $\omega\{\omega_n, \omega_s\}$ поверхности разрушения, представляющей собой дугу окружности радиусом $\omega=1$ (Рис. 2). Таким образом, в исходном недеформированном состоянии поврежденность граничного слоя отсутствует: $\omega=0$, а в момент зарождения расслоения $\omega=1$, и выражение (1) принимает вид:

$$\omega = \sqrt{(\omega_n)^2 + (\omega_s)^2} = 1. \quad (2)$$

Равенство (2) является записью условия расслоения элемента граничного слоя.

Для элемента граничного слоя введем локальную ортогональную систему координат $O123$ (Рис. 1), в которой ось 1 всегда совпадает с направлением вектора нормали n к площадке, выделенной на срединной поверхности граничного слоя. Будем полагать, что расслоение по механизму отрыва

определяется деформацией $\varepsilon_{11} = \int_0^t \xi_{11}(t) dt$, а по механизму сдвига — сдвиговыми деформациями $\varepsilon_{12} = \int_0^t \xi_{12}(t) dt$ в плоскости $O12$ и $\varepsilon_{13} = \int_0^t \xi_{13}(t) dt$ в плоскости $O13$. Здесь ξ_{11} , ξ_{12} и ξ_{13} — компоненты тензора скорости деформации, t — время деформации. Деформации ε_{22} , ε_{33} и сдвиговая деформация ε_{23} не вызывают относительного смещения соединенных слоев, поэтому в процессе разрушения расслоением не участвуют.

В феноменологических моделях когезионного разрушения традиционно используется показатель напряженного состояния $k = \sigma/T$ [29], который выражается через среднее давление $\sigma = (\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33})/3$ (здесь $\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}$ — главные напряжения), и интенсивность касательных напряжений $T = \sqrt{s_{ij} \cdot s_{ij}}/2$ (где s_{ij} — компоненты девиатора напряжений). При установлении зависимости предельной пластичности от напряженного состояния данный показатель не может рассматриваться как характеристика закономерностей расслоения границ соединения материалов, так как он определяет отношение среднего давления в точке тела к интенсивности касательных напряжений. Способность же к расслоению обуславливается величиной нормального напряжения σ_n , направленного вдоль нормали n к граничному слою (Рис. 1). При расслоении растягивающее напряжение σ_n способствует образованию новой поверхности, а сжимающее — препятствует. Поэтому в качестве характеристики напряженного состояния, от которой зависит предельная пластичность граничного слоя при сдвиге и отрыве, примем показатель $k_n = \sigma_n/T$.

В соответствии с основными положениями феноменологической теории разрушения металлов при больших пластических деформациях [29] была высказана гипотеза о том, что приращение поврежденности по механизму отрыва для граничного слоя в условиях монотонной холодной деформации $d\omega$ прямо пропорционально приращению степени деформации $d\varepsilon_{11}$ и обратно пропорционально предельной пластичности ε_n^* : $d\omega_n = d\varepsilon_{11}/(\varepsilon_n^*(k_n))$. Под предельной пластичностью ε_n^* понимается величина деформации ε_n , которую выдерживает элемент граничного слоя в испытаниях на отрыв в условиях монотонной деформации.

Введем допущение, что предельная пластичность при отрыве ε_n^* является функцией показателя k_n , и будем находить ее экспериментально. Расслоение по механизму сдвига вызывают деформации ε_{12} и ε_{13} . Приращение поврежденности за счет сдвига $d\omega_s$ запишем как сумму накопленных поврежденностей в каждой из плоскостей $O12$ и $O13$: $d\omega_s = d\omega_{12} + d\omega_{13}$, где $d\omega_{12} = d\varepsilon_{12}/(\varepsilon_s^*(k_n))$ и $d\omega_{13} = d\varepsilon_{13}/(\varepsilon_s^*(k_n))$. По аналогии с ε_n^* примем, что предельная пластичность граничного слоя при сдвиге ε_s^* есть функция показателя k_n , определяемая экспериментально. В первом приближении допустимо считать, что величина ε_s^* одинакова для плоскостей $O12$ и $O13$. Графическое представление функций $\varepsilon_s^*(k_n)$ и $\varepsilon_n^*(k_n)$ будем называть диаграммами, предельной пластичности граничного слоя, соответственно, при сдвиге и отрыве.

В случае если показатель напряженного состояния k_n при деформировании изменяется, компоненты вектора поврежденности элементов граничного слоя будем находить, согласно [34], как

$$\omega_n = \int_0^{\varepsilon_{11}} \frac{d\varepsilon_{11}}{\varepsilon_n^*(k_n)}, \quad \omega_s = \int_0^{\varepsilon_{12}} \frac{d\varepsilon_{12}}{\varepsilon_s^*(k_n)} + \int_0^{\varepsilon_{13}} \frac{d\varepsilon_{13}}{\varepsilon_s^*(k_n)}.$$

При применении численных алгоритмов для решения задач прогнозирования расслоения граничного слоя при пластической деформации накопленная поврежденность за m шагов расчета составит

$$\omega = \sqrt{\left[\sum_{i=1}^m \Delta\omega_{n_i} \right]^2 + \left[\sum_{i=1}^m \Delta\omega_{s_i} \right]^2}.$$

Заметим, что в традиционном понимании поврежденность рассматривается применительно к процессу когезионного разрушения, при котором в случае $\omega=1$ нарушение сплошности проявляется в виде трещины в материале. В обсуждаемой здесь модели нарушение сплошности происходит по границе соединения материалов, то есть разрушение имеет адгезионный характер. Конечно, разрушение граничного слоя может осуществляться и по когезионному механизму (например, при разрушении поперек

граничного слоя), но при этом расслоение материала по границе соединения не имеет места, и описанная модель не может быть использована, поскольку нельзя суммировать поврежденность при когезионном и адгезионном характерах разрушения вследствие различной физической природы этих процессов.

3. Моделирование расслоения биметаллического листа при прокатке

3.1. Материал для исследований

Возможность применения модели для вычислительных экспериментов рассмотрим на примере биметаллического листа «сталь 08X18H10T–сталь10». Лист толщиной 6 мм был изготовлен методом сварки взрывом из листов толщиной 2 мм (сталь 08X18H10T) и 4 мм (сталь 10). Выбор материала для исследования обусловлен его широким применением в промышленности в качестве конструкционного материала. Сварка осуществлена на предприятии «Уралтехнопроект» (г. Екатеринбург) по оптимальной технологии; двухслойный лист не имел дефектов в виде вмятин, расслоений и нарушений геометрической формы. Данные металлографического исследования такого материала приведены в работе [20], где показано, что в результате сварки взрывом образуется неразъемное сварное соединение, граница которого имеет характерное «волнообразное» строение. Толщина граничного слоя с измененными вследствие деформационного упрочнения механическими свойствами при ударном контактном взаимодействии определена по данным измерения микротвердости и составила 0,4 мм. Микротвердость этой зоны по шкале Виккерса (HV 0,05) оказалась на 30–35% выше, чем микротвердость соединенных материалов. Отметим, что аналогичные выводы получены авторами работы [21] для границы соединения в биметалле «сталь 12X18H10T–сталь 20», также изготовленном сваркой взрывом. Необходимые для моделирования кривые сопротивления деформации сталей 10 и 08X18H10T строили на основе данных испытаний на растяжение образцов, вырезанных из исходных листов. Испытания были проведены на универсальной испытательной машине INSTRON 8801 в Центре коллективного пользования «Пластометрия» ИМАШ УрО РАН (г. Екатеринбург). Кривые сопротивления деформации представлены на рисунке 3 как степенные зависимости

$$\sigma_s = \sigma_0 (1 + c_1 \varepsilon)^{c_2}, \quad (3)$$

где σ_s — интенсивность напряжений; σ_0 — предел текучести; ε — степень накопленной пластической деформации; c_1, c_2 — эмпирические коэффициенты, числовые значения которых приведены в таблице 1.

Таблица 1. Предел текучести и эмпирические коэффициенты к формуле (3)

Материал	σ_0 , МПа	c_1	c_2
Сталь 10	295	110	0,2
Сталь 08X18H10T	326	21	0,5
Граничный слой	594	20	0,2

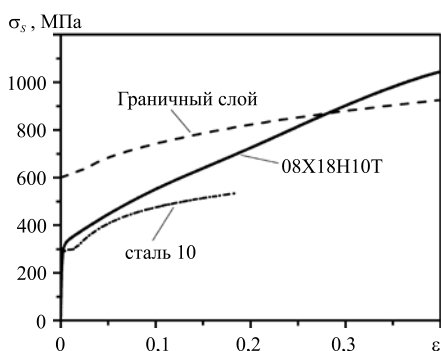


Рис. 3. Кривые сопротивления деформации

Сопротивление деформации граничного слоя биметалла находилось по методике, представленной в [35]. В основе методики лежит метод индентирования, согласно которому в металл вдавливаются тело стандартной формы. В данном случае применялись пирамидальные алмазные инденторы, с углами между гранями 90°, 123° или 136°. Испытания с записью диаграмм индентирования в координатах «усилие – глубина вдавливания индентора» осуществлялись на приборе ТЕСТ-МИНИ-(УТ) в режиме статического нагружения. В результате обработки экспериментальных данных были получены эмпирические коэффициенты к формуле (3) (см. Табл. 1), и построена соответствующая граничному слою кривая сопротивления деформации (Рис. 3).

3.2. Диаграммы предельной пластичности граничного слоя

Исходные данные для построения диаграмм предельной пластичности граничного слоя определяли на основании механических испытаний, в которых разрушение происходит за счет сдвига или отрыва слоев. Схемы таких экспериментов содержит рисунок 4.

Испытания на сдвиг при сжатии (Рис. 4а) соответствовали ГОСТ-10885 [36]. Образец (Рис. 5а) размещали между двумя направляющими, причем с целью предохранения его от изгиба одна из направляющих имела высоту, большую высоты образца. Направляющие жестко скрепляли между собой, чтобы исключить их расхождение во время эксперимента. Конструкцию в сборе устанавливали на нижнюю плиту испытательной машины и нагружали образец через верхний боек. Деформирование продолжали до момента разрушения по сварному шву.

Схема испытания на сдвиг при растяжении [37] представлена на рисунке 4б. Образец (Рис. 5б) вставляли в захваты и осуществляли деформацию за счет перемещения верхнего из них — 1, а нижний захват — 2, оставался неподвижным. Деформирование продолжали вплоть до начала расслоения по сварному шву.

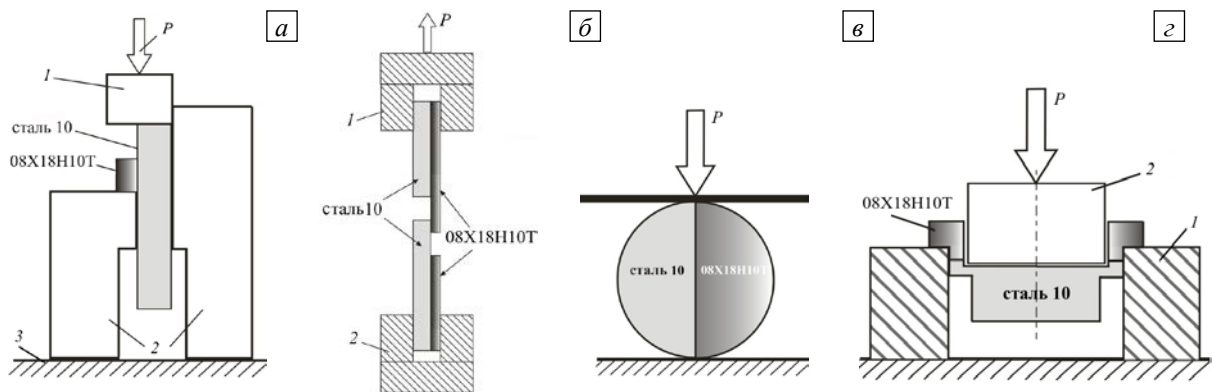


Рис. 4. Схемы испытаний: сдвиг при осадке (1 – верхний боек, 2 – направляющие, 3 – нижний боек) (а); сдвиг при растяжении (1 – верхний захват, 2 – нижний захват) (б); поперечная осадка (в); отрыв в соответствии с ТУ 27.32.09.010-2005 [38] (1 – оснастка, 2 – пуансон) (г); P – приложенная нагрузка

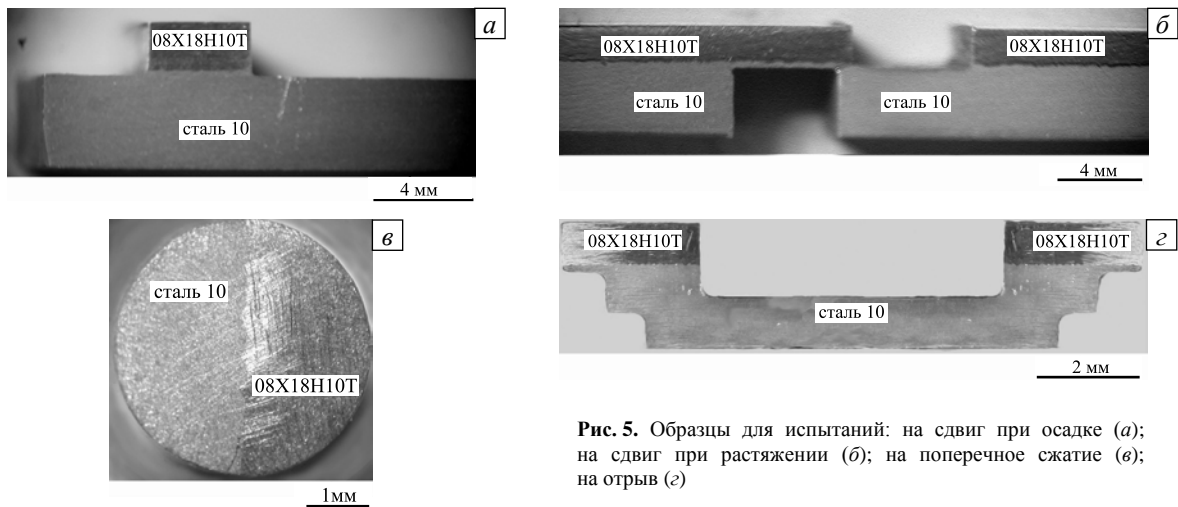


Рис. 5. Образцы для испытаний: на сдвиг при осадке (а); на сдвиг при растяжении (б); на поперечное сжатие (в); на отрыв (г)

Для исследования предельной пластичности граничного слоя в условиях действия нормальных растягивающих напряжений, при которых реализуется разрушение по механизму отрыва, образцы испытывали на отрыв по ТУ 27.32.09.010-2005 [38] и поперечное сжатие. Схема испытания на поперечное сжатие показана на рисунке 4в. В литературе подобные эксперименты также имеют название “brazil test” (бразильский тест) [39]. Опытные образцы (см. Рис. 5в) располагали между плоскими параллельными бойками так, чтобы граничный слой был параллелен действию нагрузки, а затем подвергали сжатию до расслоения. При испытаниях, в соответствии со схемой на рисунке 4г, исследуемый образец (см. Рис. 5г) укладывали выступающими краями на бортики оснастки 1, после чего сжимали с помощью перемещаемого пуансона 2 вплоть до отрыва донной части образца по граничному слою.

Нагружение образцов в экспериментах записывали с помощью бесконтактного оптического комплекса StrainMaster для последующего анализа полей перемещений методом корреляции цифровых изображений. В приведенных видах испытаний деформация близка к плоской, поэтому в результате обработки опытных данных посредством специализированного программного обеспечения, которым снабжен комплекс, были построены векторные поля перемещений, а затем определены составляющие тензора деформаций ε_{12} для испытаний на сдвиг и ε_{11} — для испытаний на отрыв в зависимости от нормированного времени испытаний \bar{t} ($0 \leq \bar{t} = t/t_p \leq 1$, где t и t_p — текущее время испытания и время, отвечающее моменту

возникновения расслоения). Анализ видеозаписи хода испытаний и синхронизированной с ней кривой нагружения в координатах «усилие–перемещение» позволил установить момент образования трещины и соотнести его с достигнутыми предельными значениями соответствующих компонент тензора деформаций. Помимо экспериментального определения компоненты тензора деформаций рассчитывались с использованием программного комплекса ANSYS AcademicResearch v. 14.0. Экспериментальные и расчетные графики деформаций показаны на рисунке 6.

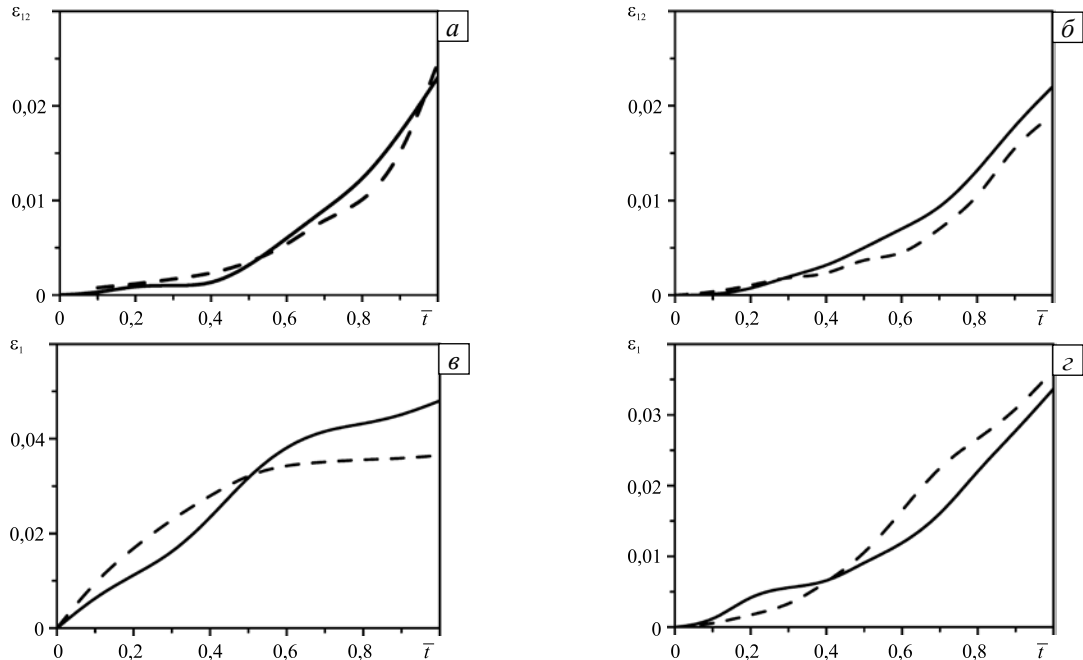


Рис. 6. Изменения деформаций ϵ_{12} , ϵ_{11} , полученные в экспериментах (---) и по результатам численного моделирования в ANSYS (—); тип испытаний: сдвиг при осадке (а), сдвиг при растяжении (б), отрыв по ТУ 27.32.09.010-2005 (в), поперечное сжатие (г)

Двумерные конечно-элементные модели рассмотренных испытаний приведены на рисунке 7. Геометрические размеры моделируемых образцов и условия деформации соответствовали размерам и условиям нагружения реальных образцов. Для учета граничного слоя в моделях введен промежуточный конечно-элементный слой с характеристиками, отвечающими экспериментальным. При испытаниях образец взаимодействовал с деформирующим инструментом и направляющими оснастки, которые при численном моделировании полагали абсолютно жесткими и в модели в расчет принимали только их жесткие контуры. Взаимодействие образца с контурами инструмента и оснастки представляли в виде контактных пар «абсолютно жесткое тело–деформируемое тело». Считали, что на соприкасающихся поверхностях реализуется трение скольжения и справедлив закон Кулона с коэффициентом трения 0,1. Граничные условия задавали в перемещениях на элементах контуров инструмента и оснастки так, как показано на рисунке 7. В качестве активного воздействия рассматривали перемещение инструмента, соответствующее условиям испытания. Для деформируемых образцов граничных условий не задавали (за исключением оси симметрии модели на рисунке 7г).

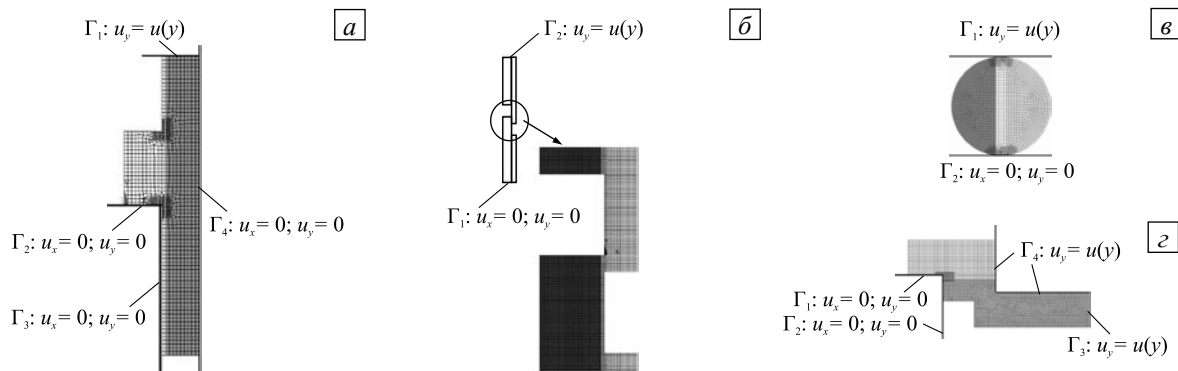


Рис. 7. Конечно-элементные модели испытаний и граничные условия в перемещениях на контурах деформирующего инструмента и оснастки при различных видах деформирования: сдвиг при осадке (а); сдвиг при растяжении (б); испытание на поперечную осадку (в); отрыв по ТУ 27.32.09.010-2005 (г)

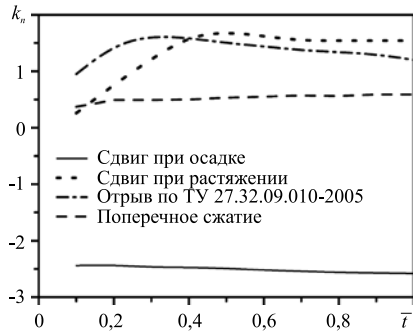


Рис. 8. Характер показателя напряженного состояния, соответствующий данным численного моделирования

искажение. Вычисленные компоненты тензора деформаций приведены на рисунке 6. Результаты расчета показателя напряженного состояния до момента разрушения показаны на рисунке 8.

Для оценки качества проведенного моделирования расчетные поля деформаций сравнивали с результатами обработки видеозаписи испытаний, осуществленной оптической системой StrainMaster (Рис. 6). Сравнение показало, что расхождение данных для определения деформаций ϵ_{12} и ϵ_{11} , установленных путем экспериментальных измерений и рассчитанных с помощью программного комплекса ANSYS AcademicResearch v. 14.0, не превышает 10%, что свидетельствует об адекватности предлагаемой феноменологической модели поврежденности и прогнозирования разрушения слоистого металлического материала, полученного сваркой взрывом.

При известных из экспериментов значениях предельных деформаций граничного слоя ϵ_{11} , ϵ_{12} , а также истории изменения их и показателя k_n при испытаниях зависимости $\epsilon_n^*(k_n)$ и $\epsilon_s^*(k_n)$ могут быть определены путем идентификации условия разрушения (2) следующего вида:

$$\omega = \sqrt{\left[\sum_{i=1}^m \Delta\omega_{n_i} \right]^2 + \left[\sum_{i=1}^m \Delta\omega_{s_i} \right]^2} = 1. \tag{4}$$

При выборе подходящих функций для описания $\epsilon_n^*(k_n)$ исходили из того, что расслоение по механизму отрыва не может произойти, если нормальные напряжения σ_n на поверхности соединения являются сжимающими. Кроме того, при увеличении растягивающих нормальных напряжений предельная пластичность при отрыве должна уменьшаться. Среди простейших функций наилучшим образом этим условиям удовлетворяет гиперболическая аппроксимация вида:

$$\epsilon_n^* = \frac{a_1}{k_n} + b_1, \tag{5}$$

где a_1 , b_1 — эмпирические коэффициенты.

Исходя из общих соображений, предполагали, что сжимающее нормальное напряжение σ_n способствует увеличению предельной деформации при сдвиге, а растягивающее нормальное напряжение σ_n способствует ее снижению. Для описания функции $\epsilon_s^*(k_n)$ была выбрана экспоненциальная зависимость, традиционно используемая для аппроксимации диаграмм предельной пластичности при когезионном разрушении [29]:

$$\epsilon_s^* = a_2 \exp(-b_2 k_n), \tag{6}$$

где a_2 , b_2 — эмпирические коэффициенты.

Таким образом, при известной истории нагружения образцов до момента расслоения граничного слоя условие разрушения является справедливым с точностью до неизвестных эмпирических коэффициентов. Для определения коэффициентов a_1 и b_1 брали данные испытаний на отрыв, а для нахождения коэффициентов a_2 и b_2 — данные испытаний на сдвиг. Следуя работам [26–30, 34, 41], функциональные зависимости предельной пластичности граничного слоя на отрыв $\epsilon_n^*(k_n)$ и на сдвиг $\epsilon_s^*(k_n)$ находили

посредством выполнения процедуры идентификации условия разрушения (4). Задачу идентификации решали с использованием программы нелинейной оптимизации GeneralizedReducedGradient (GRG2), реализованной в опции «Поиск решения» программы Microsoft Office Excel 2010. Искомыми считали пары значений коэффициентов в формулах (5) и (6), сообщающих минимум функции ошибки F :

$$F = \sum_{p=1}^N (\omega_p - 1)^2, \text{ где } N \text{ — количество испытанных образцов.}$$

Полученные значения эмпирических коэффициентов, а также значения функций ошибки F_1 и F_2 , соответственно, для испытаний на разрушение по механизму отрыва и сдвига, приведены в таблице 2. Диаграммы предельной пластичности граничного слоя при отрыве и сдвиге, построенные по результатам идентификации, представлены на рисунках 9а и 9б.

Таблица 2. Коэффициенты аппроксимации диаграмм предельной пластичности граничного слоя в биметалле «08X18H10Т–сталь 10», полученном сваркой взрывом

Разрушение по механизму отрыва (5)			Разрушение по механизму сдвига (6)		
a_1	b_1	F_1	a_2	b_2	F_2
0,0024	0,034	0,084	0,0205	0,031	0,016

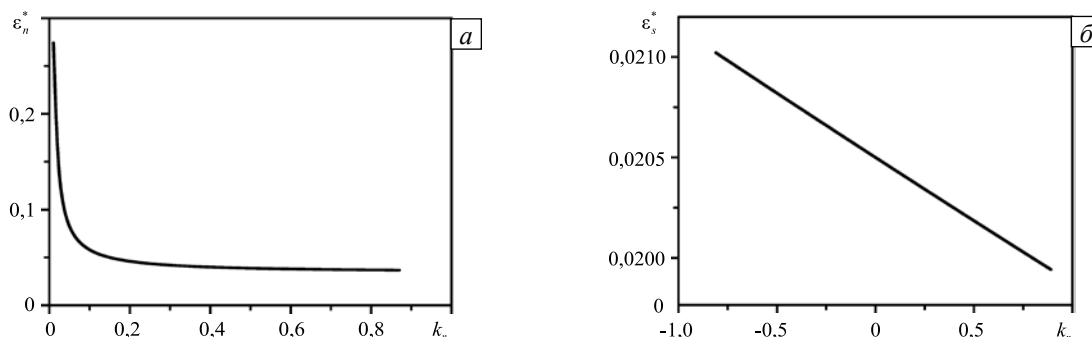


Рис. 9. Диаграммы предельной пластичности при отрыве (а) и сдвиге (б) граничного слоя в биметалле «08X18H10Т–сталь 10», полученном сваркой взрывом

3.3 Моделирование расслоения при прокатке

Биметаллический лист «сталь 08X18H10Т–сталь 10», изготовленный сваркой взрывом, при дальнейшей обработке может быть подвергнут пластическому деформированию, например, прокатке. Численное моделирование прокатки такого листа на стане дуо-кварто ИМАШ УрО РАН осуществляли с помощью программы LS-DYNA в объемной постановке. Решенная в работе [43] тестовая задача показала возможность и адекватность расчета прокатки листа посредством данной программы.

В настоящей работе использовали конечно-элементную модель, аналогичную модели, описанной в [43]. Основное внимание уделено участку граничного слоя, расположенному на свободной боковой поверхности биметаллического листа, поскольку там наиболее вероятно возникновение разрушения [42]. В соответствии с предложенной моделью на границе соединения слоев вводился промежуточный граничный слой толщиной 0,4 мм. Перед прокаткой исходная ширина образца, изготовленного из листа, составляла $B_0 = 30$ мм. Диаметр цилиндрических валков принимали равным 250 мм, относительное уменьшение толщины листа в каждом проходе прокатки составляло 10%. Конечно-элементная модель, соответствующая прокатке двухслойной полосы с граничным слоем, приведена на рисунке 10.

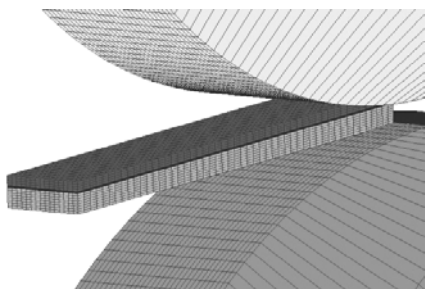


Рис. 10. Конечно-элементная модель прокатки биметалла «08X18H10Т–сталь 10»

В результате численного моделирования процесса прокатки листа получены характеристики напряженно-деформированного состояния граничного слоя на боковой грани (Табл. 3), необходимые для расчета поврежденности по механизму расслоения. Поскольку значения показателя напряженного состояния k_n оказались меньше нуля $k_n < 0$, (то есть напряжения, действующие по нормали к граничному слою, являются сжимающими по всей длине очага деформации (Табл. 3), а в этих условиях $\epsilon_n^* \rightarrow \infty$), то накопление

поврежденности по механизму отрыва не происходит. Следовательно, поврежденность граничного слоя за счет отрыва на боковой поверхности полосы при прокатке отсутствует: $\omega_n = 0$.

Для расчета накопления поврежденности элементом граничного слоя траекторию его перемещения в процессе прокатки разбивали на i участков, на которых отдельно рассчитывали приращения $(\Delta\varepsilon_{12})_i$, $(\Delta\varepsilon_{13})_i$ и средние значения k_n . Накопленную поврежденность определяли суммированием приращений поврежденности на отдельных участках: $\omega_\Sigma = \omega_s = \sum_{i=1}^m [(\Delta\omega_{12})_i + (\Delta\omega_{13})_i]$, где $(\Delta\omega_{12})_i = \left(\frac{\Delta\varepsilon_{12}}{\varepsilon_s^*}\right)_i$ и $(\Delta\omega_{13})_i = \left(\frac{\Delta\varepsilon_{13}}{\varepsilon_s^*}\right)_i$ — приращения поврежденности под действием сдвиговых деформаций $(\Delta\varepsilon_{12})_i$ и $(\Delta\varepsilon_{13})_i$.

Предельную пластичность граничного слоя на сдвиг $(\varepsilon_s^*)_i$ находили по формуле (6) при значениях эмпирических коэффициентов из таблицы 2.

Таблица 3. Результаты расчета поврежденности по механизму расслоения при прокатке биметаллического листа «сталь 08X18H10T–сталь 10»

Номер участка граничного слоя	Приращения сдвиговых деформаций		Показатель напряженного состояния (средний)	Предельная пластичность на сдвиг	Приращения поврежденности		Суммарная поврежденность
	$(\Delta\varepsilon_{12})_i \cdot 10^{-3}$	$(\Delta\varepsilon_{13})_i \cdot 10^{-3}$			k_n	$(\varepsilon_s^*)_i$	
1	0,29	0,37	-0,96	0,0211	0,0138	0,0175	0,031
2	0,11	0,11	-1,14	0,0212	0,0054	0,0050	0,042
3	0,13	0,14	-0,27	0,0206	0,0060	0,0067	0,054
4	0,06	0,33	-1,08	0,0210	0,0030	0,0157	0,073
5	0,08	0,18	-1,07	0,0215	0,0037	0,0084	0,085
6	0,04	0,03	-0,76	0,0209	0,0018	0,0014	0,088
7	0,14	0,04	-0,74	0,0209	0,0066	0,0021	0,097
8	0,14	0,02	-0,72	0,0209	0,0066	0,0008	0,104
9	0,08	0,07	-0,89	0,0210	0,0038	0,0035	0,112
10	0,09	0,05	-0,63	0,0209	0,0041	0,0024	0,118
11	0,01	0,01	-0,71	0,0209	0,0002	0,0001	0,119
12	0,04	0,01	-0,69	0,0209	0,0017	0,0005	0,122
13	0,06	0,01	-0,64	0,0209	0,0030	0,0007	0,125
14	0,08	0,01	-0,52	0,0208	0,0039	0,0007	0,129
15	0,08	0,02	-0,39	0,0207	0,0037	0,0011	0,134
16	0,01	0,01	-0,25	0,0206	0,0007	0,0002	0,135
17	0,09	0,02	-0,49	0,0208	0,0045	0,0009	0,140
18	0,09	0,01	-0,54	0,0208	0,0044	0,0001	0,1446
19	0,07	0,01	-0,51	0,0208	0,0034	0,0002	0,148
20	0,09	0,01	-0,50	0,0208	0,0046	0,0003	0,153
21	0,09	0,02	-0,50	0,0208	0,0045	0,0008	0,158
22	0,02	0,02	-0,61	0,0209	0,0007	0,0012	0,160

Из таблицы 3 следует, что за один проход суммарная поврежденность по механизму расслоения, накапливаемая граничным слоем на боковой поверхности прокатываемого образца, равняется $\omega_\Sigma = 0,16$. Считая, что приращение поврежденности в каждом из последующих аналогичных проходов прокатки с относительным обжатием 10%, имеет такую же величину, предполагали, что расслоение произойдет в 6–7-м проходе прокатки ($\omega_6 = 0,96$, $\omega_7 = 1,12$).

Для проверки прогноза проведена экспериментальная прокатка образцов из биметаллического листа «сталь 08X18H10T–сталь 10» на прокатном стане дуо-кварто ИМАШ УрО РАН при тех же условиях, что и учитывались в расчете: в валках диаметром 250 мм с относительным обжатием 10% по высоте за проход вплоть до полного разрушения образцов (что происходило после 10-го прохода). Средняя толщина слоев в биметалле после каждого прохода содержится в таблице 4.

Таблица 4. Изменение толщины слоев в биметалле «08X18H10T-сталь 10» при многопроходной прокатке

Номер прохода	Общая толщина биметалла, мм	Толщина слоя стали 08X18H10T, мм	Толщина слоя стали 10, мм
1	4,88	1,81	3,07
2	4,49	1,87	2,62
3	3,97	1,59	2,38
4	3,27	1,43	1,84
5	2,96	1,18	1,78
6	2,56	0,93	1,63
7	2,15	0,8	1,35
8	1,88	0,73	1,15
9	1,70	0,64	1,06
10	1,34	0,50	0,84

После каждого прохода свободную боковую поверхность и поперечные шлифы образцов исследовали на электронном сканирующем микроскопе, что позволило получить достаточно полную картину развития поврежденности межслойного соединения при пластической деформации прокаткой. Подробное описание характера накопления поврежденности и разрушения по проходам приведено в работе [22]. В этой работе также показано, что изначально плоская боковая поверхность полосы по мере увеличения количества проходов искривляется за счет большей величины уширения слоя из стали 10, но при этом нарушение сплошности не наблюдается вплоть до 5-го прохода, когда сдвиг слоя из стали 10 становится видимым, и его кромка начинает загибаться на боковую поверхность полосы из стали 08X18H10T. На снимке, сделанном после 6-го прохода (Рис. 11), видно, что происходит разделение разрушенной сдвигом границы. Это соответствует прогнозу, основанному на данных расчета по предложенной модели (Табл. 4).

Таким образом, сопоставление результатов экспериментов и расчетов показало возможность использования разработанной модели для описания расслоения при прокатке слоистых материалов, изготовленных сваркой взрывом. Принципиально моделирование расслоения осуществимо и в других процессах пластического деформирования составных материалов, имеющих тонкий граничный слой с измененными свойствами (например, композитов после сварки давлением и трением).



Рис. 11. Вид боковой поверхности и поперечного сечения образцов после 6-го прохода прокатки при разном увеличении

4. Заключение

В рамках феноменологического подхода к описанию разрушению предложена модель поврежденности и прогнозирования расслоения сваренного взрывом слоистого металлического материала при пластической деформации, учитывающая влияние напряженно-деформированного состояния. При этом в качестве объекта, с помощью которого осуществляется изучение расслоения, вводится элемент граничного слоя конечной толщины с усредненными свойствами, включающий границу соединения и отличающийся по механическим свойствам от свойств соединяемых материалов.

Для исследования возможностей модели при прогнозировании расслоения металлических материалов, соединенных взрывом, осуществлен комплекс экспериментальных исследований и выполнены соответствующие численные эксперименты на примере прокатки образцов из биметаллического листа «сталь 08X18H10T–сталь 10». Для предельной пластичности граничного слоя на сдвиг и отрыв получены зависимости от показателя напряженного состояния, определено изменение характеристик напряженно-деформированного состояния в области граничного слоя при механических испытаниях и прокатке биметаллического листа, описаны особенности расслоения граничного слоя при пластической деформации, сопоставлены результаты прогнозных расчетов расслоения по разработанной модели

и экспериментов по прокатке. Выполненные исследования показали, что модель адекватно и с хорошей точностью представляет развитие поврежденности и может быть использована для выполнения расчетов с целью прогнозирования расслоения при прокатке слоистых металлических материалов, полученных сваркой взрывом.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ и Правительства Свердловской области (проект № 13-08-96061).

Литература

1. Кобелев А.Г., Лысак В.И., Чернышев В.Н., Быков А.А., Востриков В.П. Производство металлических слоистых композиционных материалов. – М.: Интермет Инжиниринг, 2002. – 496 с.
2. Лысак В.И., Кузьмин С.В. Сварка взрывом. – М.: Машиностроение-1, 2005. – 544 с.
3. Olson D.L., Siewert T.A., Liu S., Edwards G.R. ASM Handbook: Volume 6. Welding, brazing, and soldering. – ASM International, 1993. – 1299 p.
4. Трыков Ю.П., Шморгул В.Г., Проничев Д.В. Методы исследования строения и свойств переходных зон сваренных взрывом металлических КМ: Учеб. пособие. – Волгоград: Политехник, 2002. – 104 с.
5. Дерibas А.А. Физика упрочнения и сварки взрывом. – Новосибирск: Наука, 1980. – 220 с.
6. Трыков Ю.П., Шморгул В.Г., Гуревич Л.М. Деформация слоистых композитов: Монография. – Волгоград: Политехник, 2001. – 242 с.
7. Чепурко М.И., Остренко В.Я., Глушкин Л.Я., Бережко Б.И., Буйновский А.М., Резников Е.А., Пелюхов Б.Д., Краснов А.Н., Коновалов В.П. Биметаллические материалы. – Л.: Судостроение, 1984. – 272 с.
8. Фудзии Т., Дзако М. Механика разрушения композиционных материалов. – М.: Мир, 1982. – 232 с.
9. Вильдеман В.Э., Соколкин Ю.В., Ташкинов А.А. Механика неупругого деформирования и разрушения композиционных материалов. – М.: Наука. Физматлит, 1997. – 288 с.
10. Ванг А. Анализ разрушения через межслойное растрескивание // Межслойные эффекты в композиционных материалах / Под ред. Н. Пэйгано. – М.: Мир, 1993. – С. 88-136.
11. Suiker Akke S.J., Fleck Norman A. Modelling of fatigue crack tunneling and delamination in layered composites // Compos. Part A-Appl. S. – 2006. – Vol. 37, no. 10. – P. 1722-1733. DOI
12. Diaz A.D., Caron J.-F. Interface plasticity and delamination onset prediction // Mech. Mater. – 2006. – Vol. 38, no. 7. – P. 648-663. DOI
13. Greve L., Pickett A.K. Delamination testing and modelling for composite crash simulation // Compos. Sci. Technol. – 2006. – Vol. 66, no. 6. – P. 816-826. DOI
14. Голованенко С.А., Меандров Л.В. Производство биметаллов. – М.: Металлургия, 1966. – 304 с.
15. Аркулис Г.Э. Совместная пластическая деформация разных металлов. – М.: Металлургия, 1964. – 271 с.
16. Засуха П.Ф., Корицков В.Д., Бухвалов О.Б., Еришов А.А. Биметаллический прокат. – М.: Металлургия, 1971. – 264 с.
17. Астров Е.И. Плакированные многослойные металлы. – М.: Металлургия, 1965. – 239 с.
18. Король В.К., Гильденгорн М.С. Основы технологии производства многослойных металлов. – М.: Металлургия, 1970. – 237 с.
19. Потапов И.Н., Лебедев В.Н., Кобелев А.Г., Кузнецов Е.В., Быков А.А., Ключников Р.М. Слоистые металлические композиции. – М.: Металлургия, 1986. – 216 с.
20. Gorkunov E.S., Zadvorkin S.M., Putilova E.A., Povolotskaya A.M., Goruleva L.S., Veretennikova I.A., Kamantsev I.S. The application of magnetic structural phase analysis for the diagnostics of the state of a 08X18N10T Steel-Ст3 steel composite material and its components that were subjected to plastic deformation // Russ. J. Nondestruct. – 2012. – Vol. 48, no. 6. – P. 346-356. DOI
21. Gladkovskii S.V., Trunina T.A., Kokovikhnin E.A., Vichuzhanin D.I., Golubkova I.A. Structure and properties of explosion-welded composite from steels 12KH18N10T and 20 // Met. Sci. Heat Treat. – 2009. – Vol. 51, no. 9-10. – P. 444-449. DOI
22. Смирнов С.В., Веретенникова И.А., Каманцев И.С., Трушина Е.Б. Исследование разрушения границы соединения слоев у полученной сваркой взрывом биметаллической полосы «08X18N10Т-сталь 10» при прокатке // Производство проката. – 2014. – № 7. – С. 14-19.
23. Durgutlu A., Gulenc B., Findlick F. Examination of copper/stainless steel joints formed by explosion welding // Mater. Design. – 2005. – Vol. 26, no. 6. – P. 497-507. DOI
24. Mousavi S.A.A.A., Sartangi P.F. Experimental investigation of explosive welding of cp-titanium/AISI 304 stainless steel // Mater. Design. – 2009. – Vol. 30, no. 3. – P. 459-468. DOI
25. Kahraman N., Gülenç B., Findik F. Joining of titanium/stainless steel by explosive welding and effect on interface // J. Mater. Process. Tech. – 2005. – Vol. 169, no. 2. – P. 127-133. DOI
26. Cizek L., Ostroushko D., Szulc Z., Molak R., Prądmowski M. Properties of sandwich metals joined by explosive cladding method // Archives of Materials Science and Engineering. – 2010. – Vol. 43, no.1. – P. 21-29.
27. Karolczuk A., Kowalski M., Bański R., Żok F. Fatigue phenomena in explosively welded steel-titanium clad components subjected to push-pull loading // Int. J. Fatigue. – 2013. – Vol. 48. – P. 101-108. DOI
28. Смирнов С.В., Швейкин В.П. Пластичность и деформируемость углеродистой стали. – Екатеринбург: УрО РАН, 2008. – 256 с.
29. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением. – Екатеринбург: Изд-во УГТУ–УПИ, 2001. – 836 с.
30. Дзугутов М.Я. Пластичность, ее прогнозирование и использование при обработке металлов давлением. – М.: Металлургия, 1984. – 64 с.
31. Красневский С.М., Макушок Е.М., Щукин В.Я. Разрушение металлов при пластическом деформировании. – Минск: Наука и техника, 1983. – 173 с.

32. Огородников В.А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением. – Киев: Вища школа, 1983. – 175 с.
33. Гладковский С.В., Трунина Т.А., Коковихин Е.А., Вичужанин Д.И., Голубкова И.А. Формирование структуры и свойств слоистых соединений металлов // Заготовительные производства в машиностроении. – 2010. – № 4. – С. 41-45.
34. Куйко И.А. Теория разрушения в процессах пластического течения / Обработка металлов давлением. Межвузовский сборник. – Свердловск: Изд-во УПИ, 1982. – С. 27-40.
35. Kononov D.A., Golubkova I.A., Smirnov S.V. Determining the strength properties of individual layers of strained laminated composites by kinetic indentation // Russ. J. Nondestruct. – 2011. – Vol. 47, no. 12. – P. 852-857. DOI
36. ГОСТ 10885-85. Сталь листовая горячекатаная двухслойная коррозионно-стойкая. Технические условия.
37. Рябов В.Р. Применение биметаллических и армированных сталеалюминевых соединений. – М.: Металлургия, 1975. – 288 с.
38. ТУ 27.32.09.010-2005. Сталь листовая двухслойная коррозионно-стойкая, изготовленная методом сварки взрывом.
39. Volinsky A.A., Moody N.R., Gerberich W.W. Interfacial toughness measurements for thin films on substrates // Acta Mater. – 2002. – Vol. 50, no. 3. – P. 441-466. DOI
40. Сорокин В.Г., Волосникова А.В., Вяткин С.А. и др. Марочник сталей и сплавов / Под общ. ред. В.Г. Сорокина. – М.: Машиностроение, 1989. – 640 с.
41. Богатов А.А., Мижирицкий О.И., Смирнов С.В. Ресурс пластичности металлов при обработке давлением. – М.: Металлургия, 1984. – 144 с.
42. Грудев А.П. Теория прокатки. – М.: Интермет Инжиниринг, 2001. – 280 с.
43. Смирнов С.В., Голубкова И.А. Моделирование процесса холодной прокатки тонких полос методом конечных элементов // Заготовительные производства в машиностроении. – 2010. – № 5. – С. 27-30.

References

1. Kobelev A.G., Lysak V.I., Chernyshev V.N., Bykov A.A., Vostrikov V.P. *Proizvodstvo metallicheckikh sloistykh kompozitsionnykh materialov* [Production of metallic layered composite materials]. Moscow: Intermet Inzhiniring, 2002. 496 p.
2. Lysak V.I., Kuz'min S.V. *Svarka vzryvom* [Explosive welding]. Moscow: Mashinostroenie-1, 2005. 544 p.
3. Olson D.L., Siewert T.A., Liu S., Edwards G.R. *ASM Handbook: Volume 6. Welding, brazing, and soldering*. ASM International, 1993. 1299 p.
4. Trykov Yu.P., Shmorgun V.G., Pronichev D.V. *Metody issledovaniya stroeniya i svojstv perekhodnykh zon svarenykh vzryvom metallicheskih KM* [Methods for investigation of structures and properties of explosion welded transition zones of metal matrix composites]. Volgograd: Polytechnic, 2002. 104 p.
5. Deribas A.A. *Fizika uprochneniya i svarki vzryvom* [Physics of hardening and welding by explosion]. Novosibirsk: Nauka, 1980. 220 p.
6. Trykov Yu.P., Shmorgun V.G., Gurevich L.M. *Deformatsiya sloistykh kompozitov* [Deformation of layered composites]. Volgograd: Polytechnic, 2001. 242 p.
7. Chepurko M.I., Ostrenko V.Ya., Gluskin L.Ya., Berezhko B.I., Bujnovskii A.M., Reznikov E.A., Pelyukhov B.D., Krasnov A.N., Kononov V.P. *Bimetallicheskie materialy* [Bimetallic materials]. Leningrad: Sudostroenie, 1984. 272 p.
8. Fujii T., Zako M. *Fracture mechanics of composite materials*. Moscow: Mir, 1982. 232 p.
9. Vildeman V.E., Sokolkin Yu.V., Tashkinov A.A. *Mekhanika neuprugogo deformirovaniya i razrusheniya kompozitsionnykh materialov* [Mechanics of inelastic deformation and failure of composite materials]. Moscow: Nauka, 1997. 288 p.
10. Wang A.S.D. Analysis of interlayer cracking fracture. *Interlaminar response of composite materials*, ed. by N.J. Pagano. Elsevier Science Publishers, 1989.
11. Suiker Akke S.J., Fleck Norman A. Modelling of fatigue crack tunneling and delamination in layered composites. *Compos. Part A-Appl. S.*, 2006, vol. 37, no. 10, pp. 1722-1733. DOI
12. Diaz A.D., Caron J.-F. Interface plasticity and delamination onset prediction. *Mech. Mater.*, 2006, vol. 38, no. 7, pp. 648-663. DOI
13. Greve L., Pickett A.K. Delamination testing and modelling for composite crash simulation. *Compos. Sci. Technol.*, 2006, vol. 66, no. 6, pp. 816-826. DOI
14. Golovanenko S.A., Meandrov L.V. *Proizvodstvo bimetallov* [Bimetal production]. Moscow: Metallurgiya, 1966. 304 p.
15. Arkulis G.E. *Sovmestnaya plasticheskaya deformatsiya raznykh metallov* [Joint plastic deformation of different metals]. Moscow: Metallurgiya, 1964. 271 p.
16. Zasukha P.F., Korshchikov V.D., Bukhvalov O.B., Ershov A.A. *Bimetallicheskiy prokat* [Bimetallic rolling]. Moscow: Metallurgiya, 1971. 264 p.
17. Astrov E.I. *Plakirovannye mnogoslojnye metally* [Plated multilayered metals]. Moscow: Metallurgiya, 1965. 239 p.
18. Korol V.K., Gildengorn M.S. *Osnovy tekhnologii proizvodstva mnogoslojnykh metallov* [Technology basics the production of multilayer metal]. Moscow: Metallurgiya, 1970. 237 p.
19. Potapov I.N., Lebedev V.N., Kobelev A.G., Kuznetsov E.V., Bykov A.A., Klyuchnikov P.M. *Sloistye metallicheskie kompozitsii* [Layered metal compositions]. Moscow: Metallurgiya, 1986. 216 p.
20. Gorkunov E.S., Zadvorkin S.M., Putilova E.A., Povolotskaya A.M., Goruleva L.S., Veretennikova I.A., Kamantsev I.S. The application of magnetic structural phase analysis for the diagnostics of the state of a 08X18H10T Steel-CT3 steel composite material and its components that were subjected to plastic deformation. *Russ. J. Nondestruct.*, 2012, vol. 48, no. 6, pp. 346-356. DOI
21. Gladkovskii S.V., Trunina T.A., Kokovikhin E.A., Vichuzhanin D.I., Golubkova I.A. Structure and properties of explosion-welded composite from steels 12KH18N10T and 20. *Met. Sci. Heat Treat.*, 2009, vol. 51, no. 9-10, pp. 444-449. DOI
22. Smirnov S.V., Veretennikova I.A., Kamancev I.S., Trushina E.B. Issledovanie razrusheniya granitsy soedineniya sloev u poluchenoj svarkoj vzryvom bimetallicheskoj polosy «08X18H10T -stal' 10» pri prokatke [An investigation

- into fracture of the layer boundary of the explosion welded bimetallic strip «Steel 08X18H10T-Steel 10» processed by rolling]. *Proizvodstvo prokata – Production of Rolled Metal*, 2014, no. 7, pp. 14-19.
23. Durgutlu A., Gulenc B., Findlick F. Examination of copper/stainless steel joints formed by explosion welding. *Mater. Design.*, 2005, vol. 26, no. 6, pp. 497-507. DOI
 24. Mousavi S.A.A. Akbari, Sartangi P. Farhadi. Experimental investigation of explosive welding of cp-titanium/AISI 304 stainless steel. *Mater. Design*, 2009, vol. 30, no. 3, pp. 459-468. DOI
 25. Kahraman N., Gülenç B., Findik F. Joining of titanium/stainless steel by explosive welding and effect on interface. *J. Mater. Process. Tech.*, 2005, vol. 169, no. 2, pp. 127-133. DOI
 26. Cizek L, Ostroushko D, Szulc Z, Molak R, Prazmowski M. Properties of sandwich metals joined by explosive cladding method. *Archives of Materials Science and Engineering*, 2010, vol. 43, no. 1, pp. 21-29.
 27. Karolczuk A., Kowalski M., Bański R., Żok F. Fatigue phenomena in explosively welded steel-titanium clad components subjected to push-pull loading. *Int. J. Fatigue*, 2013, vol. 48, pp. 101-108. DOI
 28. Smirnov S.V., Shvejkin V.P. *Plastichnost i deformiruemost uglerodisto jstali* [Plasticity and deformability of carbon steel]. Ekaterinburg: UB RAS, 2008. 256 p.
 29. Kolmogorov V.L. *Mehanika obrabotki metallov davleniem* [Mechanics of metal forming]. Ekaterinburg: Ural State Technical University, 2001. 836 p.
 30. Dzugutov M.Ya. *Plastichnost', ee prognozirovanie i ispol'zovanie pri obrabotke metallov davleniem* [Plasticity, predicting and using in metal forming]. Moscow: Metallurgiya, 1984. 64 p.
 31. Krasnevskii S.M., Makushok E.M., Shchukin V.Ya. *Razrushenie metallov pri plasticheskom deformirovanii* [Damage of metals under plastic deformation]. Minsk: Nauka i tekhnika, 1983. 173 p.
 32. Ogorodnikov V.A. *Otsenka deformiruemosti metallov pri obrabotke davleniem* [Estimation of metal deformability during forming]. Kiev: Vishcha shkola, 1983. 175 p.
 33. Gladkovsky S.V., Trunina T.A., Kokovikhin E.A., Vichuzhanin D.I., Golubkova I.A. Formirovanie struktury i svoystv sloistyx soedinenij metallov [Formation of structure and properties of lamellar composite metals]. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii – Blanking Productions in Mechanical Engineering*, 2010, no. 4, pp. 41-45.
 34. Kijko I.A. Teoriya razrusheniya v protsessakh plasticheskogo techeniya [The theory of failure in processes of plastic yielding]. *Obrabotka metallov davleniem* [Metal forming]. Sverdlovsk: Ural State Technical University, 1982. Pp. 27-40.
 35. Konovalov D.A., Golubkova I.A., Smirnov S.V. Determining the strength properties of individual layers of strained laminated composites by kinetic indentation. *Russ. J. Nondestruct.*, 2011, vol. 47, no. 12, pp. 852-857. DOI
 36. GOST 10885-85. *Stal' listovaya goryachekatannaya dvukhslojnaya korrozionno-stojkaya* [Hot-rolled corrosion-resistant clad steel sheets. Specifications].
 37. Ryabov V.R. *Primenenie bimetallicheskih i armirovannykh stalealuminevykh soedinenij* [Application of bimetallic and reinforced steel-aluminum compounds]. Moscow: Metallurgiya, 1975. 288 p.
 38. TU 27.32.09.010-2005. *Stal' listovaya dvukhslojnaya korrozionno-stojkaya, izgotovlennaya metodom svarki vzryvom* [Two-layer corrosion-resistant sheet steel produced by explosion].
 39. Volinsky A.A., Moody N.R., Gerberich W.W. Interfacial toughness measurements for thin films on substrates. *Acta Mater.*, 2002, vol. 50, no. 3, pp. 441-466. DOI
 40. Sorokin V.G., Volosnikova A.V., Vyatkin S.A. et al. *Marochnik stalej i splavov* [Book of steel and alloy grades]. Moscow: Mashinostroenie, 1989. 640 p.
 41. Bogatov A.A., Mizhiritskii O.I., Smirnov S.V. *Resurs plastichnosti metallov pri obrabotke davleniem* [Resource of metal plasticity during forming]. Moscow: Metallurgiya, 1984. 144 p.
 42. Grudev A.P. *Teoriya prokatki* [Theory of rolling]. Moscow: Intermet Inzhiniring, 2001. 280 p.
 43. Smirnov S.V., Golubkova I.A. Modelirovanie protsessa kholodnoj prokatki tonkikh polos metodom konechnykh elementov [Simulation of cold rolling of thin strips by finite element method]. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii – Blanking Productions in Mechanical Engineering*, 2010, no. 5, pp. 27-30.

Поступила в редакцию 28.05.14; опубликована в электронном виде 30.12.2014

Сведения об авторах

Смирнов Сергей Витальевич, дтн, нс, зам. дир., зав. лаб., Институт машиноведения УрО РАН (ИМАШ УрО РАН), 620219, Екатеринбург, ул. Комсомольская, д. 34; e-mail: svsv@imach.uran.ru
Веретенникова Ирина Андреевна, ктн, нс, ИМАШ УрО РАН; e-mail: irincha@imach.uran.ru
Вичужанин Дмитрий Иванович, ктн, нс, ИМАШ УрО РАН; e-mail: mmm@imach.uran.ru