

**ВЛИЯНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ПРОТИВОДАВЛЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ НА ОСОБЕННОСТИ ИСТЕЧЕНИЯ КОМПОЗИТА Al-7Fe-38Sn ПРИ ОДНООСНОЙ ОСАДКЕ В ЗАКРЫТОЙ ПРЕСС-ФОРМЕ**

*В.Е. ЛИХАРЕВ<sup>1,2</sup>, Н.М. РУСИН<sup>2</sup>, А.Л. СКОРЕНЦЕВ<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

<sup>2</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,

E-mail: [Vel6@tpu.ru](mailto:Vel6@tpu.ru)

Сплавы системы Al-Sn относят к антифрикционным материалам из-за способности олова выполнять функции твёрдой смазки и предотвращать схватывание со стальным контртелом при сухом и граничном трении. Давление схватывания их со сталью растёт с увеличением концентрации Sn до тех пор, пока каркас из Al зёрен остаётся непрерывным. В литых сплавах предельная концентрация олова  $\leq 20\%$ , но в спечённых каркас сохраняется и при вдвое большем его содержании [1]. Ослабление матричного каркаса оловянными прослойками локализует пластическое течение при малых нагрузках. Интенсивный сдвиг зёрен вдоль прослоек вызывает их утончение и исчерпание пластичности, что ведет к отслоению верхнего ряда зёрен и износу. Для уменьшения изнашивания сплавов Al-Sn следует затруднить смещение зёрен матрицы вдоль Sn прослоек, например, добавляя твердые частицы, хорошо смачиваемые оловом и алюминием. С этой целью была приготовлена смесь элементарных порошков Al, Sn и Fe состава Al-7Fe-38Sn. При её спекании алюминий диффундировал в порошинки железа, образуя интерметаллид  $Al_3Fe$ . В конце сплавообразования на месте железных порошинок оставались агломераты из сцементированных оловом твёрдых частиц. Затем спечённый образец подвергали одноосной ковке в закрытом штампе при различных температурах с целью сделать распределение частиц алюминидов железа вдоль границ Al зёрен более равномерным за счёт изменения формы агломератов.

Схема используемой дляковки пресс-формы приведена на рисунке 1а. В этом случае по определению Губкина [2] материал находится в плоском деформированном состоянии и испытывает в плоскости течения деформации равные по величине и противоположные по знаку:  $-\varepsilon_z = \varepsilon_x$ , то есть зёрна матрицы вдоль оси **Z** сжимаются, а вдоль оси **X** удлиняются. В нашем случае образец при прессовании осаживался на половину его высоты, то есть, относительная деформация  $\varepsilon = 50\%$ . В идеале при такой ковке зёрна матрицы в плоскости течения также должны в два раза сжаться по оси **Z** и в два раза удлиниться в направлении **X**.

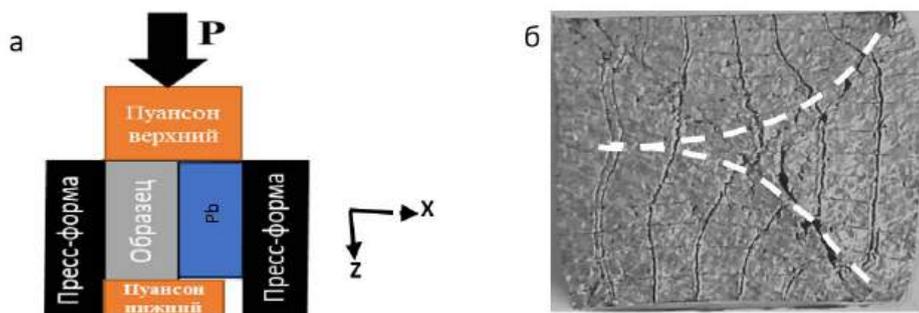


Рисунок 1. Схема прессования образца в закрытой пресс-форме (а) и вид координатной сетки на плоскости течения после  $\varepsilon = 30\%$  (б)

На рисунке 1б приведена фотография плоскости течения образца с нанесённой на неё координатной сеткой после осаживания образца на 30% при 300 °С. Видно, что по торцам образца при его осаживании сформировались две зоны с заторможенным течением материала. Причём верхняя зона может двигаться в сторону нижней под нажимом пуансона, тогда как

нижняя зона в левом углу канала практически неподвижна. При вдавливании верхняя зона отесняет впередилежащий материал вниз и в направлении оси X. Тогда как расположенный у задней стенки материал оказывается запертым между зонами и при сжатии за счёт сил реакции может сдвигать одну или обе зоны вправо, заставляя их скользить по поверхности пуансонов. Разнонаправленные перемещения частей образца порождают на границах между зонами растягивающие напряжения, приводящие к растрескиванию материала (рисунок 1б). То есть, давление, развиваемое на торцах образца при прессовании композиционных образцов, оказывается достаточно высоким, чтобы поверхностные неровности контртел, продавив смазочную плёнку, пришли в соприкосновение. Под влиянием высоких сил контактного трения по торцам образца формируются зоны заторможенного течения, при обтекании которых наблюдается растрескивание материала.

Для снижения сил контактного трения в дополнение к смазке по торцам прессуемых образцов были размещены тонкие свинцовые пластины. Это привело к снижению давления прессования почти вдвое. Однако зоны заторможенного материала по торцам образца не исчезли, хотя размер их уменьшился. Это хорошо видно на снимках, размещённых в левой колонке таблицы 1. Более того, с ростом температуры прессования размер указанных зон растёт из-за ослабления композиционного материала. Неоднородность его течения усиливается, и в полосах локализации деформации появляются трещины.

Известно, что деформация кристаллических материалов осуществляется скольжением дислокаций по определённым плоскостям. Плоскости группируются в пачки и формируют полосы локализованной деформации. Вход полосы на поверхность кристалла сопровождается образованием ступенек и формированием дислокационного рельефа [3]. Отражающая способность неровной поверхности снижается, и при наблюдении под микроскопом эти области видны как более тёмные. Чем темнее область, тем большее число полос скольжения пересекает в этом месте наблюдаемую поверхность.

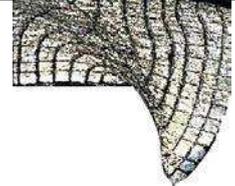
Анализ градации серого цвета на фотографиях в левой колонке таблицы 1, указывает, что наиболее равномерно деформация распределяется по плоскости течения прессования при 200 °С. Здесь лишь узкие прилегающие к пуансонам области остаются светлыми, но чем ближе к середине образца располагается наблюдаемая поверхность плоскости течения, тем темнее она становится. Цвет её меняется постепенно, и изгиб вертикальных линий сетки, а также вытянутая форма её ячеек подтверждают указанное распределение деформации. С ростом температуры прессования деформация всё больше сосредотачивается вблизи границ областей с заторможенным материалом. Её локализация приводит к появлению трещин на границах указанных зон, тогда как материал внутри зон испытывает незначительные деформации, что подтверждается сохранением формы ячеек сетки на поверхности таких зон.

Из практики обработки материалов давлением известно, что повышение гидростатического давления при прессовании способствует сохранению целостности прессуемого материала. В нашем случае прессование проводилось в закрытой пресс-форме, поэтому стало возможным повысить гидростатическое давление за счёт заполнения пустот между образцом и стенками канала свинцом и последующим их совместным осаживанием. Выдавливание свинцового вкладыша осуществлялось через щель 5 или 10мм между нижним пуансоном и стенкой канала по мере осаживания образца, рисунок 1а. Результаты влияния ширины щели на характер распределения деформации в образце представлены во второй и третьей колонки таблицы 1.

Их анализ показывает, что силы контактного трения по торцам образца продолжают влиять на характер течения материала, и в левом нижнем углу канала пресс-формы формируется застойная зона. Однако с увеличением температуры прессования размеры её сокращаются, а сама зона начинает плющиться, как следует из формы ячеек и характера изгиба вертикальных линий, расположенной на её поверхности координатной сетки. Поскольку передняя часть образца под нажимом верхней зоны заторможенного течения может смещаться не только вправо, но и вместе со свинцом вглубь щели, то правая граница зоны проявляется на снимках

не столь чётко. Течение материала, как следует из расположения областей более тёмного цвета, сосредотачивается в промежутке между боковыми гранями застойных зон в виде полос локализованного сдвига.

Таблица 1 – Влияние противодействия на характер пластического течения спечённых образцов Al-7Fe-38Sn при осаживании в пресс-форме

Тк, °С	Ширина щели S, мм		
	0 мм	10 мм	5 мм
200			
300			

Результатом концентрации здесь течения является смещение передней части образца вниз и вправо и образование в нижней его части «зуба». Ширина зуба с повышением температуры прессования растёт за счёт того, что напряжение течения свинца снижается, и он интенсивно оттесняется передней частью более твёрдого образца из канала пресс-формы. Зазор между передней гранью образца и стенкой канала становится тоньше, но совсем не исчезает.

Остаётся он и в случае ширины щели 5 мм. Высота зуба меньше, чем в случае 10-миллиметровой щели, и в неё затекает меньший объём материала. Давление прессования в этом случае выше, и его рост приводит к тому, что нижняя застойная зона начинает плющиться и сдвигаться вправо, на что указывает вытянутая форма ячеек сетки. То есть, в этом случае деформация распределяется по объёму прессуемого образца более равномерно, и полоса локализации сдвиговых деформаций более размыта.

Из представленных результатов следует, что неоднородность пластического течения композиционного материала Al-7Fe-38Sn при ковке в закрытой пресс-форме обусловлена действием сил контактного трения. Под их влиянием по торцам осаживаемого образца формируются зоны заторможенного пластического течения, которые материал вынужден обтекать, что приводит к растрескиванию материала по границам упрочнённых областей. Показано, что приложение к осаживаемому образцу обратного давления предотвращает растрескивание, однако с целью организации более однородного пластического течения способ приложения противодействия следует модернизировать за счёт совершенствования конструкции пресс-формы.

*Работа выполнена в рамках реализации проекта РНФ № 23-29-00669.*

### Список литературы

1. Rusin N.M., Skorentsev A.L. Special features of structure formation in a composite due to sintering a mixture of elementary powders of Al, Fe and Sn // Metal Science and Heat Treatment. – 2022. – Vol. 63. – Iss. 9. – 10. doi:10.1007/s11041-022-00727-8.
2. Губкин С.И. Теория обработки металлов давлением / М.: Металлургиздат, 1947. – 352 с.
3. Sangid M.D. The physics of fatigue crack initiation // International Journal of Fatigue. – Vol.57. – 2013. – pp. 58–72. https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2012.10.009.