

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ТЕЧЕНИЯ И НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ РАВНОКАНАЛЬНОМ УГЛОВОМ ПРЕССОВАНИИ**

**Пряхин С.С., Ломач М.С., Рубаник В.В., Рубаник В.В. мл.**

Институт технической акустики НАН Беларуси,

г. Витебск, Республика Беларусь

Равноканальное угловое прессование (РКУП) является перспективным направлением модификации структуры материала. Оно использует воздействие интенсивной пластической деформации простого сдвига на материал при его прессовании через область пересечения каналов с одинаковой площадью сечения [1]. При этом в металлах и сплавах происходит измельчение размера зернистой структуры и улучшение при этом ряда физико-механических свойств.

Однако для реализации РКУП необходимо создавать значительные усилия по продавливанию заготовки через матрицу. Одним из путей снижения усилия прессования, является уменьшение сил трения между заготовкой и оснасткой, а также снижение деформационных усилий в зоне сопряжения каналов матрицы. В частности, за счет применения устройств с различными вариантами сопряжений между входным и выходным каналами [1, 2], и понижающих трение смазок [3], известно, что ультразвуковая обработка является одним из высокоэффективных методов не только влияния на силовые условия деформирования, но и на изменение микроструктуры и физико-механических свойств материалов [4]. Так за счет ультразвукового воздействия возможно улучшение структуры металлов при литье, снятие внутренних напряжений в деформированных металлах, повышение характеристик пластичности (акустопластический эффект) и др. При этом, в зависимости от частоты, амплитуды, локальности воздействия, можно достичь как упрочнения металла, так и его разупрочнения, пластификации. В частности, эффективно и оправданно использование ультразвуковых колебаний при обработке металлов давлением (ОМД), например, волочение и прессование порошковых материалов. В частности, предложено интенсифицировать процесс прессования порошка пьезокерамики за счет энергетического ультразвукового воздействия [5], где ультразвуковые колебания (УЗК) снижая силы трения влияют как на протекание процесса прессования, так и на свойства получаемых заготовок. Ранее были получены экспериментальные данные о существенном снижении в 1.5- 2 раза нагрузки РКУП при использовании ультразвуковых колебаний [6].

Цель исследований состояла в установлении влияния взаимно связанных факторов: силовой характеристики процесса, трения, динамики распределений полей течения и переменных напряженно-деформированного состояния в прессуемом материале. При этом использовалось сопоставление характеристик, полученных путем моделирования РКУП с учетом трения и без трения. Исследована возможность снижения нагрузки прессования до уровня, полученного в экспериментах [6], за счет влияния ультразвуковых колебаний на величину эф-

фективного коэффициента трения. Для моделирования РКУП использовалась двумерная постановка задачи расчета динамики напряженно-деформированного состояния с использованием пакета DEFORM 2D, входящего в состав программного комплекса DEFORM 10.0.

Рисунок 1а иллюстрирует схему моделируемого процесса и взаимодействия участвующих в нем объектов при РКУП. Матрица 1 имеет два канала входной 2 и выходной 3, имеющие одинаковую ширину  $d = 5$  мм. Каналы пересекаются между собой под углом  $90^\circ$ , образуя передний 4 и задний 5 углы сопряжения. Во входной канал матрицы помещается прессуемый пластический объект первоначально в виде заготовки, имеющей высоту 20 мм и ширину  $d = 5$  мм. Активным элементом является пуансон 7, который движется с постоянной скоростью  $V$ . Под нагрузкой пуансона заготовка выпрессовывается в выходной канал матрицы. Движение пуансона прекращают после того, как он достигнет кромки переднего угла.

Рисунок 1б иллюстрирует представления задачи моделирования плоских напряженно-деформированных состояний, в котором компоненты тензоров деформации и компоненты векторов скоростей, имеющие индекс  $z$ , имеют нулевые значения. Для нагрузочных характеристик в пакете DEFORM 2D толщина прессуемого материала и оснастки по умолчанию принимается равной единичному размеру  $\Delta Z = 1$  мм.

Материал элементов оснастки для прессования матрица и пуансон считается жестким. В качестве модельного материала прессуемого объекта из Библиотеки материалов программного комплекса DEFORM V10.0 выбран сплав AL 1100, имеющий жесткопластическую модельную функцию течения. Материал прессуемого объекта считали объемно несжимаемым, а описание связи между напряжением и деформацией формулировали в виде уравнений теории пластического течения Леви-Мизеса. Трение материала описывалось законом Амонтона-Кулона. РКУП рассматривали как процесс изотермический.

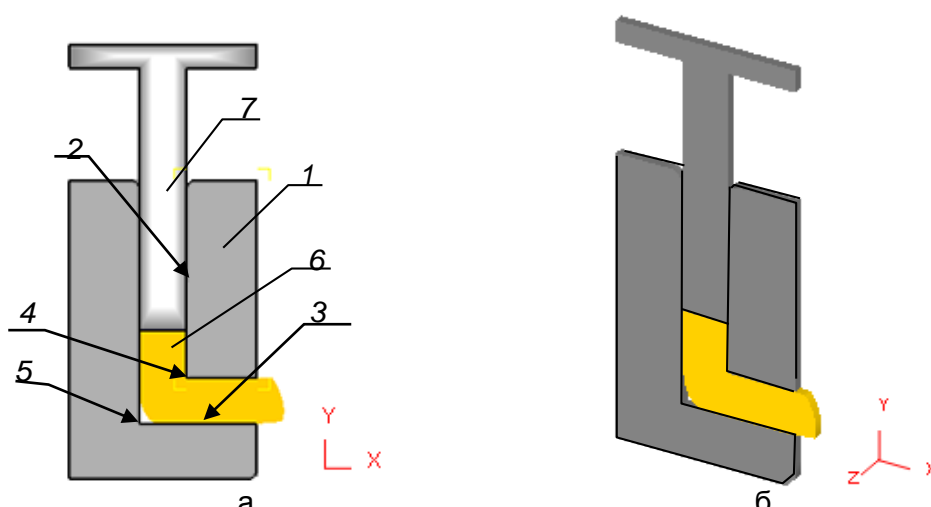
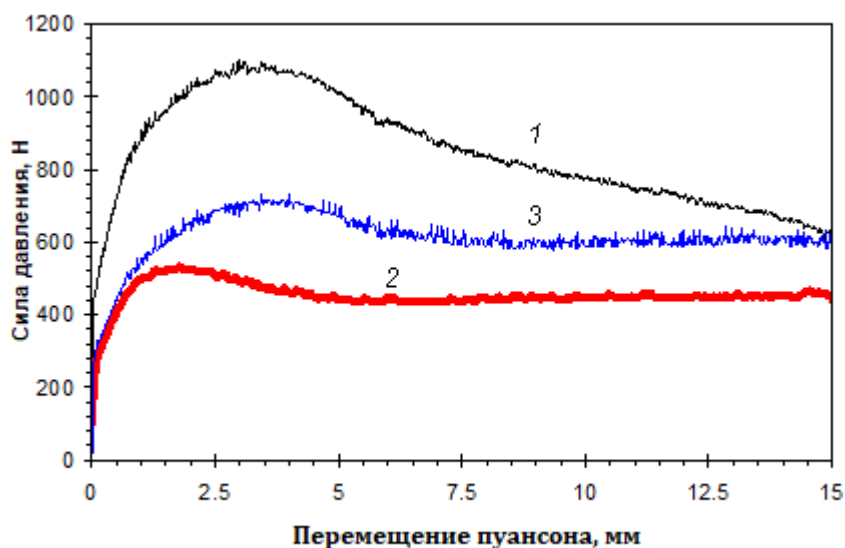


Рисунок 1 – Схема реализации РКУ прессования - а; и модельные представления в рамках плоских напряженно-деформированных состояний - б

При моделировании были получены результаты, свидетельствующие, что скорость перемещения плунжера оказывает малое влияние на нагрузку прессования, а динамика ее изменения определяется величиной его перемещения. Это связано с тем, что закон течения пластического материала в изотермическом процессе слабо зависит от скорости деформации. При этом в заданной геометрии РКУП история полей деформации определяется расстоянием перемещения плунжера. Результаты моделирования приводятся для одной скорости перемещения пуансона  $V = 4.0$  мм/с.

Моделирование показывает, что трение оказывает существенное влияние на динамику изменения нагрузки. На рисунке 2 приведены нагрузочные характеристики для процессов, осуществляемых в процессах с трением (кривая 1) и без трения (кривая 2). Их сопоставление показывает, что в процессе с нулевым коэффициентом трения пик начального максимума достигается быстрее, и он имеет меньшую ширину в сравнении с пиком процесса с участием трения. Далее следует участок с почти стационарной величиной нагрузки вплоть до значения 15 мм. Последующее движение сопровождается перекрытием пуансоном сечения выходного канала.



**Рисунок 2 – Зависимости нагрузки на пуансон от расстояния его перемещения при коэффициентах трения: 1)  $\mu = 0.12$ ; 2)  $\mu = 0$ ; 3) сила давления на прессуемый материал на входе в зону пересечения входного и выходного каналов при  $\mu = 0.12$**

Для выяснения роли трения в падении нагрузки проведен расчет динамики силы давления перед границей области пересечения каналов, в которой формируется область с наиболее высокой интенсивностью напряжения. Применялось отслеживание компоненты напряжения  $\sigma_y$  по текущим значениям в 11 точках, расположенных перед пересечением каналов вдоль неподвижной линии ориентированной в направлении оси  $X$ . Характеристика изменения силы давления при прессовании на рисунке 2 представлена зависимостью 3. Аналогично процессу без трения после пика максимума на этой кривой образуется линейный участок, сохраняющий стационарный характер при дальнейшем перемещении пуансона. Исходя из этого результата, можно утверждать, что разность между

кривой 1 и кривой 3 характеризует линейный характер уменьшения силы трения во входном канале. В этом случае перемещение пуансона сопровождается равномерным перетеканием материала через зону деформации из области высокого давления в область пониженного давления. В процессе без трения такого механизма нет. Это объясняет отличие поведения линейных участков нагрузочных кривых 1, 2 на рисунке 2 в процессах с трением и без трения.

Проводился расчет нагрузки в условии наложения ультразвуковых колебаний продольно направлению скорости перемещения пуансона  $V_0$  с учетом эффективного значения коэффициента трения  $\mu_{\text{USO}}$  (1), полученного из результатов работы В.Кумара:

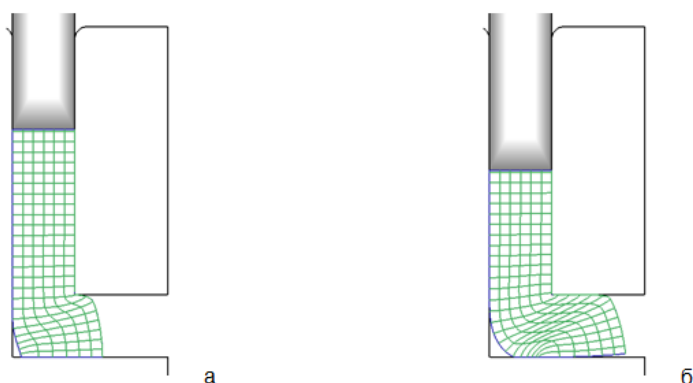
$$\mu_{\text{USO}} = \mu \frac{2}{\pi} \arcsin\left(\frac{V_0}{a\omega}\right) \quad (1)$$

При исходных данных в (1): скоростях поступательного движения  $V_0 = 0.5 \div 8.0$  мм/с; амплитуде ультразвуковых колебаний  $a = 5$  мкм; циклической частоте колебаний  $\nu = 18$  кГц, величина  $\mu_{\text{USO}}$  на 2-3 порядка меньше в сравнении с коэффициентом трения скольжения в отсутствии колебаний  $\mu = 0.12$ . В результате такого падения трения расчетная зависимость нагрузки от перемещения пуансона становится графически неразличимой с зависимостью в отсутствии трения (кривая 2). Таким образом, экспериментальные данные об эффекте снижения нагрузки в 1.5-2 раза за счет применения ультразвука в процессе РКУП в [5] могут быть обоснованы эффектом снижения силы трения скольжения при наложении колебаний продольно направлению скорости перемещения тела, описанным в работе [7].

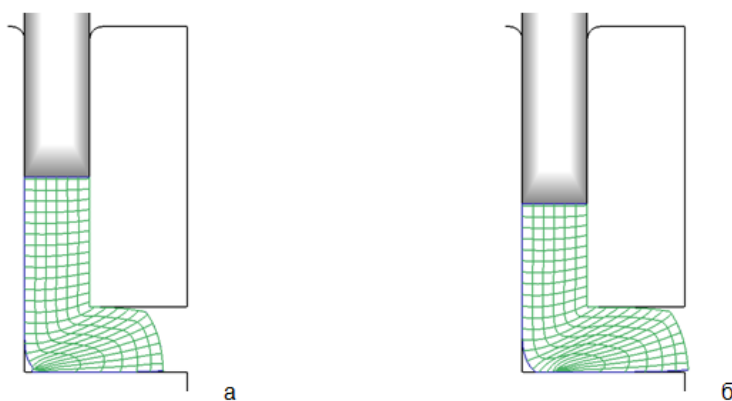
Сопоставляя диаграммы динамики лагранжевой сетки, выявим особенности течения пластического материала, проявляющиеся без трения (рисунок 3) и в условии трения (рисунок 4). После начальной стадии вытеснения материала на стадии максимальной нагрузки начинается установление течения материала относительно кромки переднего угла матрицы. При этом в процессе без трения установление такого течения сопровождается отрывом материала от кромки заднего угла. В процессе с трением такой отрыв происходит на более поздней стадии пластического течения. И лагранжева сетка приобретает более протяженный участок с сильными искажениями. Трение на дне матрицы препятствует такому отрыву материала и установлению течения, как вдоль нижней границы матрицы, так и верхней границы выходного канала. В обоих случаях пресования искажение сетки выше зоны пересечения каналов незначительны.

Отличия в динамике распределений интенсивностей напряжений показаны на рисунке 5а (процесс без трения) и рисунке 5б (с трением). На диаграмме, полученной для процесса без трения, прежде всего, обращает на себя внимание поведение области с максимальными их значениями. Она имеет веретенообразную форму. С момента отрыва материала от заднего угла ее локализация остается практически неизменной. Концы этой области соприкасаются с кромкой переднего угла и крайней левой точкой соприкосновения движущегося материала с дном матрицы. Ее размеры и форма также практически неизменны. Охватывающие данную область соседние области с уровнями напряжения чуть пре-

вышающими порог пластического течения (40 МПа) отстоят от зоны пересечения каналов во входном канале на  $\sim 3.7$  мм и на 1.3 мм в выходном. Поэтому интенсивности напряжения в материале после выходного канала несопоставимо малы в сравнении с максимальными интенсивностями.



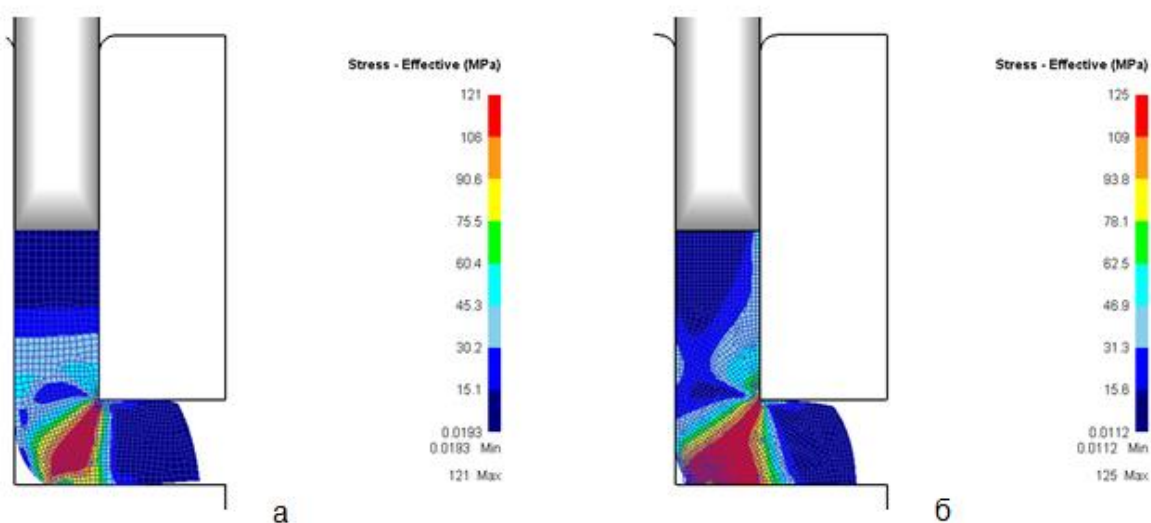
**Рисунок 3 – Изменения лагранжевой сетки пластического течения для  $\mu = 0$  при перемещениях пуансона а) 1.75 мм; б) 5.05 мм**



**Рисунок 4 – Изменения лагранжевой сетки пластического течения для  $\mu = 0.12$  при перемещениях пуансона а) 5.05 мм; б) 7.5 мм**

В процессе с трением область с максимальными интенсивностями напряжения отличается по форме. Она верхним концом также касается переднего угла матрицы, но имеет протяженную границу соприкосновения с дном матрицы, соразмерную ширине каналов. После отрыва материала от кромки заднего угла (рисунок 5б) и установления течения граница ее соприкосновения дном матрицы незначительно сокращается. Однако лишь условно можно утверждать, что она при этом приобретает веретенообразную форму к моменту пересечения пуансоном выходного канала. В выходном канале на расстоянии  $\sim 1.7$  мм от области пересечения каналов интенсивность напряжения также становится малой. Однако во входном канале, у правой его границы, с момента достижения максимальных нагрузок образуется протяженная область повышенных интенсивностей напряжения. По цветовой диаграмме уровень ее интенсивности напряжений сопоставим с порогом течения. Поэтому в диаграмме на рисунке 4а не-

большие искажения лагранжевой сетки для материала во входном канале перед очагом деформации можно обнаружить.



**Рисунок 5 – Распределения интенсивности напряжения для стадии перемещения пуансона 5.05 мм а) при  $\mu = 0$ ; б)  $\mu = 0.12$**

Анализ результатов моделирования дает основание утверждать, что качественные изменения динамики нагрузки и полей напряженно-деформированных состояний связаны фазами установления течения пластического материала через матрицу:

- в начале прессования происходит вытеснение материала из зоны пересечения каналов в выходной канал, а течения вдоль стенок выходного канала нет. В этой фазе скорость нарастания нагрузки по перемещению пуансона максимальная. Трение между материалом и стенками входного канала повышает эту скорость. В зоне пересечения каналов появляется область с повышенной интенсивностью напряжения;

- начинается течение материала вдоль верхней кромки выходного канала. В этой фазе скорость нарастания нагрузки падает до нуля, при этом величина нагрузки достигает максимума. В зоне пересечения каналов происходит нарастание интенсивности напряжений;

- начинается течение вдоль дна зоны пересечения каналов и нижней кромки выходного канала. Трение между материалом и нижней кромкой выходного канала затягивает фазу установления течения. Нагрузка прессования в этой фазе спадает нелинейно. Область с высокими интенсивностями напряжений в пересечении каналов становится стабильной и более компактной. Образуется выраженный перепад объемного напряжения в материале, перетекающем из входного канала в выходной через область с высокими интенсивностями напряжений;

- установившееся течение. Поведение очага пластической деформации стабильно. Характеризуется линейным характером изменения нагрузки прессования от перемещения пуансона. В моделируемых процессах с трением происходит линейный спад, без трения нагрузка имеет стационарный характер.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Процессы пластического структурообразования металлов / В. М. Сегал, В. И. Резников, А. Е. Дробышевский, В. И. Копылов и др. – Мн.: Навука і тэхніка. 1994. - 232 с.
2. Iwahashi, Y. An investigation of microstructural evolution during equal channel angular pressing / Iwahashi, Y., Z. Horita, M. Nemoto and T.G. Langdon // Acta Materialia. – 1997. – 45. – P. 4733-4741.
3. Балакин, В. Ф. Анализ возможностей различных технологических смазок в процессах с ИПД / В.Ф. Балакин, В.С. Гришин, И.А. Соловьева, О.В. Сергеева, К.С. Белан // Теория и практика металлургии 1-2 2012 с.52-55.
4. Клубович В.В., Степаненко А.В. Ультразвук и пластичность.- Минск: Наука и техника, 1976. - 446 с.
5. Шилин, А.Д., Ультразвуковая механоактивация порошковых материалов / А.Д. Шилин, В.В. Рубаник, В.В. Рубаник (мл.) // Перспективные материалы и технологии / Под. ред. В.В.Клубовича – Витебск: Изд-во УО «ВГТУ», 2013. – Гл. 30. – С. 630-651.
6. Рубаник, В. В. Влияние ультразвукового воздействия на силовые характеристики равноканального углового прессования цинка / В.В. Рубаник, В.В. Рубаник мл., М.С. Ломач, В.Ф. Луцко, В.В. Дедюро // Техническа акустика: разработки, проблемы, перспективы. Материалы межд. научн. конф. Витебск, Беларусь 25-28 мая 2021. - С.132-133.
7. Kumar, V.C. Reduction of the sliding friction of metals by the application of longitudinal or transverse ultrasonic vibration / V.C. Kumar, I.M. Hutchings // Tribology International. - 2004. - V. 37. – P. 833–840.

УДК 539.3:621.78

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ НА ПОВЕРХНОСТИ МАТЕРИАЛА ПРИ ДЕЙСТВИИ ПЛАЗМЕННОЙ СТРУИ

**Веремейчик А.И., Онысько С.Р., Хвисевич В.М., Холодарь Б.Г.,  
Хеук М.В., Ярмак М.А.**

Брестский государственный технический университет, г. Брест,  
Республика Беларусь

При поверхностной плазменной закалке используется действие движущихся концентрированных источников энергии, создающих направленную высокотемпературную газовую струю с плотность теплового потока на поверхности  $10^7 - 10^{10} \frac{Вт}{м^2}$ . Поверхностная закалка сталей связана с изменением фазовой структуры и физико-механических характеристик материала и созданием в нем мелкозернистого мартенсита. Для обеспечения этого процесса производится