

Введение Перспективным направлением существенного улучшения технологических и эксплуатационных свойств литых заготовок является получение в них мелкодисперсной структуры, в частности с параметрами близкими к наноразмерам [1]. Одним из наиболее эффективных способов получения такого рода структур является интенсивное пластическое деформирование (ИПД). Методы ИПД основаны на многократном воздействии на материал высокого давления для достижения больших степеней деформации. При получении больших пластических деформаций без формоизменения заготовок в основном используют два метода ИПД: кручение дисковых заготовок на наковальнях Бриджмена и равноканальное угловое (РКУ) прессование цилиндрических заготовок. В последнее время появился ряд новых технологических схем ИПД: «песочные часы»; винтовое прессование, при котором интенсивные сдвиговые деформации достигаются путем гидромеханического прессования призматических заготовок через матрицу с винтовым каналом, сечение которого, ортогональное оси прессования, постоянно вдоль этой оси. Угол ската винтовой линии изменяется по высоте матрицы, причем на ее начальном и конечном участках этот угол равен нулю. Благодаря указанным особенностям геометрии канала форма заготовки после выдавливания не изменяется, что позволяет осуществить ее многократное прессование с целью накопления интенсивных деформаций [2]. Такие технологические виды ИПД имеют ряд достоинств. Во-первых, можно изготовить массивные образцы для проведения механических испытаний. Во-вторых, в получаемых материалах отсутствует остаточная пористость. В-третьих, эти методы можно использовать для получения сверхмелкозернистой структуры не только в чистых металлах, но и в промышленных сплавах, что позволяет говорить о перспективах промышленного применения. Экспериментальная часть Авторами статьи разработан новый способ ИПД, основанный на многократном повторении операций поперечного и обратного выдавливания. В результате ИПД, получая большие деформации заготовка, в конечном итоге, сохраняет свою исходную форму и размеры, либо получает форму (стержень с утолщением на конце), из которой впоследствии может быть изготовлена высокопрочная деталь с мелкозернистой структурой [3]. ИПД по данной технологической схеме (рис. 1) осуществляется следующим способом: металлическую заготовку 5 помещают в матрицу 3, установленную на специальной плите 6 с большой шероховатостью поверхности и закрепленную в бандаже 4. Высота матрицы превышает высоту заготовки. Рис. 1 - Технологическая схема процесса ИПД выдавливанием: а) начало стадии обратного выдавливания; б) стадия обратного выдавливания; в) начало стадии закрытого поперечного выдавливания; г) завершение стадии поперечного выдавливания (исходная позиция для следующего цикла деформирования); D, d - диаметры заготовки после цикла обработки «обратное выдавливание (d) - поперечное выдавливание (D)» На заготовку устанавливают

сплошной 1 и полый 2 пуансоны, осуществляют закрытую осадку с целью заполнения полости и устранения пустот. Затем производят обратное выдавливание до тех пор, пока металл не заполнит примерно 90% полости, после чего осуществляется закрытое поперечное выдавливание металла внутренним сплошным пуансоном до совпадения нижних поверхностей полого и сплошного пуансонов. Далее вновь производят обратное, а затем поперечное выдавливание. После этого полый и сплошной пуансоны извлекают из бандажированной матрицы, матрицу переворачивают на 180°, ставят на шероховатую подставку и все перечисленные действия повторяют вновь до тех пор, пока не будет достигнута необходимая деформация и получена соответствующая ей структура металла. Экспериментальные данные, позволяющие судить о повышении пластичности после ИПД по предложенной схеме, получены при изготовлении заготовок из литого свинца. Использование свинца как модельного материала обусловлено рядом факторов. Свинец из-за низкой температуры плавления в лабораторных условиях позволяет реализовать полный металлический цикл. Путем легирования свинца небольшим количеством сурьмы, теллура (до 0,5 %) можно изменять механические свойства модельных сплавов в довольно широких пределах. Увеличение процентного содержания легирующих элементов приводит, как правило, к повышению прочностных и снижению пластических свойств. Эти сплавы чувствительны к изменению скорости деформации, их кривые упрочнения при комнатной температуре подобны кривым упрочнения многих промышленных сплавов при «горячей» деформации [4]. Кроме того, низкое сопротивление свинца и его сплавов деформированию $\sigma = (20 \div 30)$ МПа против более 200 МПа для алюминия и более 800 МПа для сталей при комнатных температурах позволяет изготавливать компактный и конструктивно простой инструмент для проведения экспериментов с ИПД. Таким образом, деформирование свинцовых образцов при комнатной температуре позволяет прогнозировать поведение многих промышленных сплавов при той же гомологической (сходственной) температуре, т.е. при горячей деформации. В таблице 1 приведены данные (Тпл - температура плавления, $\Theta/\Theta_{пл}$ - гомологическая температура, Θ - температура деформирования, σ - сопротивление деформирования при гомологической температуре) для некоторых сплавов, поведение которых при горячем пластическом деформировании моделирует свинец, деформируемый в нормальных условиях. Таблица 1 - Свойства некоторых сплавов, поведение которых при горячем пластическом деформировании моделирует свинец

Материал	Тпл, К	$\Theta/\Theta_{пл}$	Θ , К	σ , МПа
Свинец	600	0,5	298	≈40
Сталь 08кп	1798	899	≈800	
Сплав АМц	928	464	≈220	

Перечисленные факторы позволяют относительно просто установить благотворное влияние новой схемы ИПД, если таковое существует, на пластические свойства и сопротивляемость разрушению металлов и сплавов. Влияние ИПД на пластичность обработанного материала

определяли с использованием свинцовых образцов полученных: вариант 1 - литьем в металлический кокиль; вариант 2 - литьем с последующим деформированием обратным выдавливанием (рис. 1, б); вариант 3 - литье и два цикла закрытого поперечного выдавливания (рис. 1, в) и обратного выдавливания. Полученные литьем в кокиль заготовки выдавливали на гидравлическом прессе с деформирующей силой $P = 105H$. Заготовку и инструмент смазывали пастой из коллоидного графита и глицерина. При выдавливании среднюю относительную степень деформации определяли по формуле: $\epsilon = \frac{f_0 - f_1}{f_1}$ (1) где f_0 и f_1 - соответственно площади сечения исходной заготовки до и после деформации. Истинную (логарифмическую) степень деформации определяем по формуле: $\epsilon_{\ln} = \ln \frac{f_0}{f_1}$ (2) Связь между логарифмической и относительной деформациями определяется зависимостью: $\epsilon_{\ln} = \ln(1 + \epsilon)$ (3) Накопленная в результате ИПД выдавливанием итоговая за n циклов деформация будет равна: $\epsilon_{\ln} = n \cdot \epsilon_{\ln}^{\text{цикл}}$ (4) где $\epsilon_{\ln}^{\text{об}}$, $\epsilon_{\ln}^{\text{пв}}$ - логарифмические деформации при обратном и поперечном выдавливании. В рассматриваемом случае при двух циклах ИПД выдавливанием образец без изменения первоначальных размеров и формы получил итоговую логарифмическую деформацию равную 6. Пластические свойства геометрически идентичных образцов изготовленных по вариантам 1, 2, 3 оценивались с использованием той же инструментальной оснастки (снимается матрица 3 и бандаж 4) по схеме открытого поперечного выдавливания (рис. 2) при неизменной высоте кольцевого зазора h_0 . Рис. 2 - Схема технологического испытания поперечным выдавливанием пластических свойств материалов: d_0 - диаметр испытуемого образца; D_p - текущее значение диаметра в процессе испытания; $\bullet$ - реперные точки на боковом контуре образца, для которых рассчитывается изменение параметров напряженно-деформированного состояния в процессе испытания; P - деформирующая сила. Выбор такой схемы испытания связан с тем, что она позволяет получать в выдавливаемой части большие деформации без потери устойчивости образцов. Поскольку поперечное выдавливание имеет широкое распространение в промышленности для изготовления деталей с фланцем, то такое испытание может служить технологической пробой на пригодность того или иного материала для изготовления подобного класса деталей. Зоной, где наиболее вероятно разрушение при поперечном выдавливании является свободная от контакта с инструментом боковая поверхность деформируемой части образца. Об этом свидетельствует и производственный опыт. Здесь возникает «жесткая» схема напряженного состояния. Эволюцию напряженно-деформированного состояния на боковой поверхности оценивали исходя из искажения нанесенной на нее делительной сетки. Образцы деформировали с различными обжатиями. Окружную деформацию определяли по соотношению: $\epsilon_{\text{окр}} = \frac{a - a_0}{a_0}$ (5) Деформацию в направлении касательной к контуру рассчитывали по формуле: $\epsilon_{\text{кас}} = \frac{b - b_0}{b_0}$ (6) В соотношениях (5) и (6) величины a_0 , b_0 , a , b - соответствующие размеры

делительной сетки до и после деформирования образца. На всех стадиях деформирования степень деформации ϵ оказалась равной окружной деформации ϵ_ϕ , что позволяет отказаться от трудоемких измерений для определения других компонентов деформированного состояния, т.к. ϵ_ϕ определяется по диаметру до и после деформации для соответствующей стадии. Главные напряжения на боковой поверхности рассчитывали исходя из соотношений деформационной теории. С учетом того, что на свободном от контакта с инструментом контуре $\sigma_2 = 0$ следует: , (7) тогда , (8) . (9) Расчеты показали, что окружное напряжение в экваториальном сечении на свободном контуре является растягивающим, осевые напряжения там же близки к нулю, т.е. реализуется схема напряженного состояния близкая к линейному растяжению. Значения K - показателя схемы напряженного состояния определялись по формуле , (10) где s - среднее напряжение, рассчитанное по формуле (7); s_i - интенсивность напряжений. Определенные параметры напряженно деформированного состояния (в зоне вероятного разрушения) использовались для построения функции $K = K(\epsilon_i)$ характеризующей путь деформирования материальной частицы в зоне вероятного разрушения при поперечном выдавливании. Путь деформирования материальной частицы в координатах ϵ_i , K представлен линией 1 на рис. 3. Момент разрушения материала на этой линии помечен значком *. Рис. 3 - Траектория $K=K(\epsilon_i)$ деформирования при технологическом испытании на пластичность поперечным выдавливанием - 1; место разрушения литого образца (2), место разрушения образца после обратного выдавливания (3) Значения ϵ_i , K определенные для различных вариантов подготовки образцов располагались на одной и той же кривой, т.е. функция $K = K(\epsilon_i)$ оказалась единой для различных состояний материала. Оценка влияния рассматриваемого способа ИПД на пластические свойства деформируемых по реализованной схеме технологического испытания образцов показала следующее: литая заготовка (вариант 1) разрушалась при незначительных деформациях; заготовка, обработанная по варианту 2 (литье + обратное выдавливание) выдерживала деформацию без разрушения вплоть до $\epsilon = 2,7$, заготовка, обработанная по варианту 3 (литье + два цикла ИПД) не разрушалась вообще, даже при $\epsilon > 3$. Согласно правилу А.А. Бочвара деформирование при гомологической температуре выше 0,4 проходит в условиях горячей деформации, когда проявляется разупрочнение как совокупность процессов динамической полигонизации, рекристаллизации, сфероидизации пластинчатых структур и формирования благоприятной ориентировки плоскостей скольжения. Динамическая рекристаллизация в этом случае возникает при достижении высокой плотности дислокаций, которой соответствует критическая степень деформации $\epsilon = (0,8 \div 0,9)\epsilon_{\max}$, где $\epsilon_{\max}$ деформация соответствующая максимуму на кривых $s - \epsilon$ для свинца это $(0,2 \div 0,3)\epsilon$. Образовавшаяся в результате динамической рекристаллизации

структура мелкодисперсна, но неустойчива. Устойчивый комплекс свойств формируется в результате статической рекристаллизации, которая происходит после динамической рекристаллизации в свинце при комнатной температуре. О существенном измельчении зерна в подвергшихся ИПД образцах свидетельствует состояние свободной боковой поверхности образцов после технологического испытания поперечным выдавливанием. Обработанные ИПД предложенным методом образцы имели идеально гладкую, блестящую, свободную боковую поверхность после поперечного выдавливания. Пластические свойства материала чрезвычайно высокие. Разрушения не удалось достичь даже при степенях деформации выше 3. У литого образца (вариант 1) поверхность грубая «типа» апельсиновой корки, что характерно для весьма крупнозернистой структуры. Поэтому даже в условиях горячей деформации литые образцы до разрушения выдерживали незначительную деформацию (рис. 3, точка разрушения * - 1). Согласно [1,5] такое поведение материала характерно для субмикрозернистых структур, которые позволяют достичь сверхпластичных свойств в процессе деформации сплава при гомологических температурах. Таким образом, за счет ИПД по предложенной технологии залечивается пористость и другие дефекты литейного происхождения, значительно повышается пластичность и качество поверхностей заготовки свободных от контакта с инструментом.