

УДК 621.777.4

Д. В. ПАВЛЕНКО¹, А. Ф. ТАРАСОВ², Я. Е. БЕЙГЕЛЬЗИМЕР³, В. Ю. КОЦЮБА⁴¹ Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина² Донбасская государственная машиностроительная академия, Краматорск, Украина³ Донецкий физико-технический институт им. А. А. Галкина, Киев, Украина⁴ АО "МОТОР СИЧ", Запорожье, Украина

КОНСТРУКТИВНЫЕ АСПЕКТЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ОСНАСТКИ ДЛЯ ВИНТОВОЙ ЭКСТРУЗИИ

Рассмотрены особенности проектирования и эксплуатации штампов для обработки металлов давлением с точки зрения особенностей конструкции и условий работы оснастки для интенсивной пластической деформации заготовок методом винтовой экструзии. На основе анализа требуемых режимов деформирования титановых и железоникелевых сплавов выделены требования к конструкции матриц, материалам для их изготовления, смазывающе-технологическим средам, а также условиям работы винтовых матриц. Предложены рекомендации по разработке рациональной конструкции технологической оснастки для деформации заготовок винтовой экструзией в условиях серийного производства. На их основании предложены технические решения и конструктивные мероприятия по усовершенствованию конструкции технологической оснастки для реализации процесса винтовой экструзии высокопрочных сплавов для авиационной техники. Показаны примеры разработанных различных конструктивных схем реализации винтовых матриц.

Ключевые слова: интенсивная пластическая деформация, винтовая экструзия, матрица, пуансон, заготовка, титановый сплав, железоникелевый сплав.

Введение

Уникальные возможности повышения механических характеристик заготовок при использовании процессов интенсивной пластической деформации (ИПД) металлов и сплавов способствуют их широкому применению в различных отраслях промышленности. Достаточно много работ посвящено эффективности применения различных методов ИПД для повышения свойств компактных материалов в литом и деформированном состояниях [1], а также заготовок из порошков и стружки. Так, в литературе приведены результаты применения ИПД для формирования субмикроструктурной структуры в железоникелевых сплавах [2], а также уплотнения алюминиевой стружки [3], смеси порошковых компонентов для получения компактных титановых полуфабрикатов методами порошковой металлургии [4 - 6], в том числе ударными нагрузками [7, 8].

Эффективность применения методов ИПД достигается прежде всего за счет формирования в обработанных заготовках субмикроструктурной структуры и повышения комплекса прочностных свойств [9 - 14]. Также методы ИПД могут успешно применяться для получения псевдосплавов и композиционных материалов с уникальным сочетанием физических, механических и эксплуатационных

свойств [15 - 18].

Для реализации ИПД объемных заготовок применяют специальные установки, устанавливаемые на гидравлические прессы [19], а также специальную технологическую оснастку. Одним из основных элементов установки для ИПД методом винтовой экструзии (ВЭ) является винтовая матрица. Тяжелые условия ее работы и особенности конструкции определяют долговечность и надежность установки для ВЭ в целом. Изнашивание винтового канала матрицы в процессе деформации заготовок оказывает значительное влияние на себестоимость обработки заготовки. В случае применения винтовой матрицы неразъемного типа, разрушение в ней образца может приводить к ее полному выходу из строя.

Особенностям проектирования и эксплуатации оснастки для обработки металлов давлением посвящен ряд как отечественных, так и зарубежных исследований [20]. Так, в работе [21] показано, что процесс проектирования прессовой оснастки требует детального анализа условий деформирования и конструкции инструмента. В ряде исследований указывается, что для эффективной разработки надежной штамповой оснастки необходимо использовать специализированные расчетные системы, позволяющие моделировать напряженно-деформированное состояние (НДС) как элементов штампо-

вой оснастки [22], так и обрабатываемой заготовки [23]. Указывается также, что для процессов горячей штамповки моделирование необходимо выполнять с учетом адекватных моделей зависимости свойств материалов оснастки и полуфабриката от температуры, а также динамических процессов, протекающих в процессе обработки. Для проектирования основных силовых элементов штамповой оснастки и их надежной работы необходима разработка математических моделей силового взаимодействия базовых деталей и определение нагрузок, действующих на несущие элементы оснастки [24]. В работе [25] приведены рекомендации по проектированию основных силовых элементов универсально-сборной штамповой оснастки. Анализ влияния формы канала матриц на параметры процесса интенсивного пластического деформирования заготовок круглого поперечного сечения при обработке методом винтового уширяющего прессования выполнен в работе [26]. Особенности проектирования оснастки для винтовой экструзии, а также совершенствованию технологии и устройств для ее реализации посвящена работа [27].

Методы ИПД объемных заготовок требуют многоэтапного прессования заготовок для накопления больших степеней деформации с применением в ряде случаев различных сред, которые передают усилие на заготовку. Общим существенным признаком известных способов многоэтапного прессования заготовок с применением ИПД является значительное трение о стенки канала матрицы, что не позволяет снизить усилие прессования и обеспечить на высоком уровне ее долговечность. При гидромеханическом прессовании в качестве рабочей среды используется жидкость [28, 29]. Основными недостатками такого способа являются: необходимость специальной подготовки торца заготовки, чтобы выполнить ее уплотнение в матрице, и недостаточное количество смазки между заготовкой и матрицей на рабочем участке канала, что снижает технологичность процесса, приводит к увеличению усилия прессования и снижению долговечности матрицы. Применяют также квазижидкие среды, которые, попадая в зазор между контейнером и заготовкой, разделяют их поверхности, что приводит к уменьшению усилия прессования. Прессование заготовок через канал винтовой матрицы с помощью металлических фальш-заготовок повышает технологичность процесса. Однако высокие контактные напряжения, которые возникают на поверхностях контакта заготовки и матрицы, приводят к налипанию материала фальш-заготовок на поверхность контейнера и матрицы, что также снижает долговечность винтовой матрицы.

Учитывая большие нагрузки и усилия, которые воспринимают элементы штамповой оснастки, используемой при интенсивной пластической деформации металлов и их сплавов, особую роль при их проектировании играет назначение зазоров в подвижных соединениях, в частности между винтовой матрицей и пуансоном. При его малой величине, особенно с учетом дифференцированного нагрева матрицы, пуансона и обрабатываемой заготовки, может происходить заклинивание и, как следствие, полное разрушение как винтовой матрицы, пуансона, так и других элементов установки для ВЭ. Увеличенный зазор приводит к проникновению в него металла фальш-заготовки. Практика эксплуатации оснастки для ВЭ показала, что при определенных условиях возможно заклинивание заготовки или фальш-заготовок в матрице. В работе [30] также показано, что интенсивная пластическая деформация заготовки методом осадки и кручения под высоким давлением может оказаться вообще невозможной из-за заклинивания заготовки в полости матрицы вследствие радиальной деформации заготовки при действии осевой сжимающей силы и значительного увеличения момента сопротивления вращению пуансона.

Актуальность задачи проектирования штамповой оснастки с учетом сохранения зазоров между матрицей, заготовкой и пуансоном отмечают также авторы работы [31]. Показано, что изменение зазора вызывается износом в связи с высоким уровнем нагрузок и тяжелыми условиями работы рабочих поверхностей матрицы и пуансона. Авторы также указывают на необходимость оптимизации конструкции штамповой оснастки с точки зрения выбора как материала, так и геометрии, что оказывает влияние на ее стоимость и долговечность работы.

Несмотря на достаточно большое количество исследований, посвященных проектированию прессовой оснастки для объемной штамповки, количество публикаций, посвященных проектированию инструментов для обработки давлением методами интенсивной пластической деформации, весьма ограничено, так как значительная часть работ выполняется как экспериментальные исследования. В связи с этим исследования, направленные на анализ аспектов проектирования и эксплуатации матриц для винтовой экструзии, являются актуальными.

Целью настоящей работы являлась разработка рациональной конструкции технологической оснастки для деформации заготовок винтовой экструзией. Для ее достижения были решены задачи, связанные с анализом условий деформации материалов различных классов, НДС образцов с различным поперечным сечением, особенностей конструкций винтовых матриц, а также конструктивных мероприя-

тий, направленных на снижение усилия деформирования и повышение долговечности матрицы.

Материалы и методы исследований

Исследования выполняли для трех классов материалов: компактные и некомпактные (порошковые и спеченные) титановые сплавы BT1-0, BT8, а также железоникелевые сплавы ЭП718-ИД, Inconel 718, применяемые для изготовления лопаток компрессора газотурбинных двигателей.

Моделирование НДС компактных образцов выполняли для стадии установившейся деформации методом конечных элементов (КЭ) в системе ANSYS. Использовали тетрагональные, твердотельные, прочностные КЭ, позволяющие задавать степени свободы для узлов в виде угла поворота относительно оси. Количество КЭ в основной части модели образца составляло 20...25 тысяч при общем количестве КЭ порядка 30...40 тысяч.

Результаты исследований и их анализ.

Одним из основных элементов установки для винтовой экструзии, во многом определяющим эффективность процесса ИПД, является винтовая матрица. Необходимость оптимизации геометрических параметров винтового канала связана с особенностями условий, необходимых для реализации процессов перемешивания, фрагментации структуры и залечивания пористости в некомпактных материалах. Оценка и оптимизация НДС особенно важна для образцов, полученных из металлических порошков, в связи с необходимостью соблюдения условий сохранения их целостности при каждом цикле деформирования.

Для формирования субмикроструктурной структуры винтовой экструзией призматическую заготовку пропускают через матрицу, имеющую винтовой канал с углом ската винтовой линии 500-600. Угол ската винтовой линии на начальном и конечном участках равен нулю, что позволяет сохранять исходную форму заготовки после деформации. Для обеспечения высокого уровня гидростатической компоненты в очаге деформации обработку выполняют с противодавлением. Реализуя последовательно от 3 до 7 циклов деформирования винтовой экструзией, обеспечивают большую степень деформации материала простым сдвигом. При этом структура материала заготовки фрагментируется, происходит формирование зерен с большими углами ориентировки, средний размер которых находится в диапазоне 200 ... 300 нм [32].

Нерациональная конструкция винтовой матрицы в сочетании с режимными параметрами процесса

деформации может приводить к ее разрушению. Для исключения подобных явлений и получения гомогенной субмикроструктурной структуры во всем объеме заготовки необходимо соблюдение ряда условий, в том числе учет свойств деформируемого сплава при температуре деформирования и размеров заготовки. Оснастка должна обеспечивать наличие касательных напряжений, достаточных для дробления структурных элементов, а также зон «перетекания» материала в пределах поперечного сечения заготовки для гомогенизации структурных элементов сплава на макро- и микроуровнях. Выполнение этих условий возможно за счет оптимизации конструктивных параметров винтовой матрицы, которую, с учетом сложности формы ее канала, эффективно выполнять численными методами.

Моделирование деформации заготовок квадратного и прямоугольного сечения ВЭ и последующий анализ распределения касательных напряжений, эквивалентных деформаций и векторов перемещений в различных сечениях образцов показал, что максимальное значение интенсивности скорости деформации заготовок достигается в верхней и нижней плоскости винтового канала, где деформация осуществляется по схеме простого сдвига. По поперечному сечению заготовки деформация распределена неравномерно, с минимумом на оси симметрии [12, 33]. В зависимости от геометрических параметров канала матрицы, характерная величина эквивалентной деформации за один проход на периферии заготовки находится в диапазоне 1,5 ... 2,0. При этом характерные значения деформации на оси могут изменяться от 0,1 до 0,7. В зависимости от задач ВЭ стремятся либо выровнять деформацию по сечению, либо наоборот, увеличить ее градиент [12, 18].

В средней части канала происходит «перетекание» материала в пределах поперечного сечения заготовки [35, 36], способствующее явлению перемешивания материала, что является особенно важным при деформации сложнолегированных сплавов и порошковых образцов, обеспечивая гомогенизацию легирующих элементов по сечению заготовки. При этом наибольшие перемещения и, следовательно, наиболее благоприятные условия для гомогенизации возникают в заготовке прямоугольного сечения.

Анализ поведения железоникелевых сплавов при термомеханической обработке показал, что большое значение имеет температура технологической оснастки. Для изготовления оснастки для горячей штамповки наиболее часто используют теплоустойчивые стали типа Ди22 (4Х4ВМФС) и другие, обладающие возможностью работать в диапазоне температур до 600°C [37].

Если температура штампа ниже температуры заготовки, за счет интенсивного теплоотвода в процессе контакта инструмента и заготовки, ее температура будет снижаться. Охлаждение обрабатываемой заготовки может приводить к формированию неоднородной микроструктуры и ее разрушению. При этом напряжение течения материала заготовки повышается и увеличивается величина нагрузки, необходимая для проведения деформации. Одним из способов снижения этого эффекта является использование подогрева штампов до более высокой температуры (540...830) °С в зависимости от применяемого материала.

Ввиду тяжелых условий работы технологической оснастки в процессе винтовой экструзии, сложно обеспечить ее нагрев выше температуры 400 ... 500°С. Это объясняется высокой стоимостью инструментальных материалов, способных выдерживать необходимые нагрузки при температуре более 500°С.

Это означает, что деформировать методом ВЭ в температурном диапазоне 915 ... 995°С (рекомендованном для получения мелкого зерна в заготовках из железоникелевых сплавов) целесообразно лишь заготовки с достаточно большим поперечным сечением, так как заготовки малых размеров будут сильно охлаждаться при контакте с оснасткой. Повышение скорости деформирования уменьшает время контакта заготовки с оснасткой и, как следствие, ее охлаждение, однако это приводит к значительному увеличению уровня нагрузок на инструмент. Таким образом, для формирования в железоникелевых сплавах субмикроструктурной структуры в горячей области целесообразно сделать теоретические оценки минимального размера заготовок, которые целесообразно деформировать методом ВЭ в указанном температурном интервале.

Альтернативным технологическим процессом является деформирование в области относительно низких температур «теплой» деформации. В этом случае деформацию винтовой экструзией необходимо реализовать при температурах нагрева оснастки порядка 300 ... 400 С, что определяется условием перевода рабочей среды ВЭ (графито-стеклянной смеси), выполняющей роль смазки, в квазижидкое состояние. Для исключения температурных градиентов по объему заготовок обеспечивают их нагрев перед ВЭ до температуры нагрева технологической оснастки.

На основании проведенного анализа можно сделать вывод, что формирование мелкозернистой структуры в железоникелевом сплаве ЭП-718ИД можно осуществить методом винтовой экструзии по двум альтернативным технологиям. Первый вариант технологии предполагает деформирование в горячей

области в диапазоне температур 940 ... 995°С. Вторым вариантом предполагается реализацию деформации в «теплой» области в диапазоне температур 300 ... 400°С. С точки зрения практической реализации в условиях серийного производства малоразмерных полуфабрикатов для лопаток компрессора ГТД данный вариант является более рациональным.

Не менее важно контролировать температуру заготовки при ВЭ титановых сплавов, отличающихся низкой теплопроводностью. Известно, что обработка давлением жаропрочных титановых сплавов без разрушения, например, таких, как ВТ6, возможна только в области высоких температур. Температура начала деформации при ковке данного сплава составляет 1100°С, а температура окончания деформации 850°С [38]. Учитывая высокий уровень гидростатического давления в заготовке, характерный для ВЭ, обработку без разрушения можно выполнять при более низкой температуре. Установленные в работе [39] закономерности показали, что, например, для сплава ВТ8М-1 в субмикроструктурном состоянии процессы рекристаллизации протекают уже при температуре 550°С. Практический опыт показал, что ВЭ сплавов данного класса рационально реализовывать при температуре заготовки в диапазоне 450 ... 650°С, снижая температуру на последних циклах обработки. Для сохранения ее целостности температура технологической оснастки должна поддерживаться на таком же уровне.

Учитывая особенности деформации металлов простым сдвигом, реализуемым при ВЭ, среднее значение эквивалентной деформации оценивают, используя соотношение (1) [27].

$$\epsilon_{\text{mean}} = 3,46 \times \left(\frac{h_s}{R}\right)^{-0,47} \times \left(\frac{L_d}{h_s}\right)^{0,55} \times \left(\frac{h}{b}\right)^{-0,56}, \quad (1)$$

где h , b – соответственно высота и ширина поперечного сечения призматической заготовки;

R – радиус описанной вокруг сечения заготовки окружности; L_d – длина винтового участка матрицы,

h_s – длина полного шага винтовой линии.

Минимальную величину эквивалентной деформации оценивают по формуле (2):

$$\epsilon_{\text{min}} = 3,08 \times \left(\frac{h_s}{R}\right)^{-0,56} \times \left(\frac{L_d}{h_s}\right)^{0,87} \times \left(\frac{h}{b}\right)^{-1,15}. \quad (2)$$

Анализ зависимостей (1) и (2) позволил установить, что диаметр описанной вокруг поперечного сечения заготовки окружности должен находиться в диапазоне от 25 мм до 50 мм, а ее длина составлять

не менее 2,5 диаметра. Исходя из этого, для практической реализации процесса ВЭ принят размер заготовки 18x25x70 мм со скругленными боковыми гранями (рис. 1).

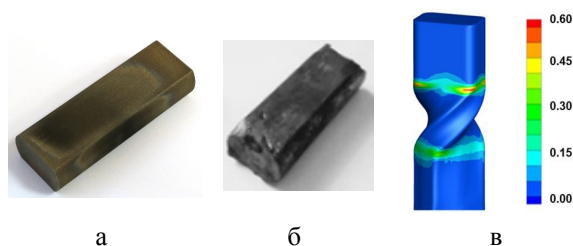


Рис. 1. Общий вид исходной призматической заготовки для ВЭ (а), заготовки после ВЭ (б) и поле интенсивности скорости деформации заготовки в процессе ВЭ, c^{-1} (в)

Конструкция разъемной винтовой матрицы для деформации ВЭ призматических заготовок показана на рис. 2 [40].



Рис. 2. Общий вид разъемной винтовой матрицы с каналом прямоугольного сечения

Опыт практического применения призматических заготовок показал возможность формирования, для рассматриваемых классов материалов, субмикроструктурной структуры и повышения комплекса их свойств. Однако, как было сказано ранее, для обеспечения удовлетворительной степени гомогенизации спеченных сплавов и размера зерна по сечению и перемешивания необходимо проведение последовательно 5-7 циклов деформации вследствие наличия нейтральной линии на оси заготовки. Кроме того, призматическая заготовка в ряде случаев оказывается нетехнологичной в производстве, особенно когда в качестве исходной заготовки используется прутки или цилиндрическая отливка. Это повышает трудоемкость процесса ВЭ и себестоимость получаемых полуфабрикатов.

В работах [41, 42] показана возможность использования для ВЭ прутков круглого сечения в матрицах со смещенной осью. На рис. 3 приведено устройство винтовой матрицы круглого поперечного сечения со смещенной осью [42]. Поверхность ее канала состоит из двух цилиндров и винтового участка между ними. Последний образован окружностью, совершающей одновременно поступательное вдоль некоторой прямой OO_1 , перпендикуляр-

ной плоскости окружности и расположенной на расстоянии C от ее центра, а также вращательное движение вокруг нее. Таким образом, окружность является образующей винтовой поверхности, а прямая OO_1 – ее осью. Винтовой участок однозначно определяется длиной H , величиной шага винтовой поверхности h (величиной поступательного перемещения окружности при ее повороте вокруг оси на угол 2π), радиусом окружности r и расстоянием C . Если $0 < C/r < 1$, то ось винтовой поверхности матрицы проходит внутри ее поперечного сечения. Ось винтовой поверхности является особой линией в поле скоростей ВЭ. Вокруг этой оси возникает вихрь, а деформация вблизи нее имеет наименьшее значение [43]. В общем случае, в качестве образующей винтовой поверхности могут быть использованы не только окружности, но и любые другие замкнутые кривые. Это приводит к получению винтовых матриц различного сечения.

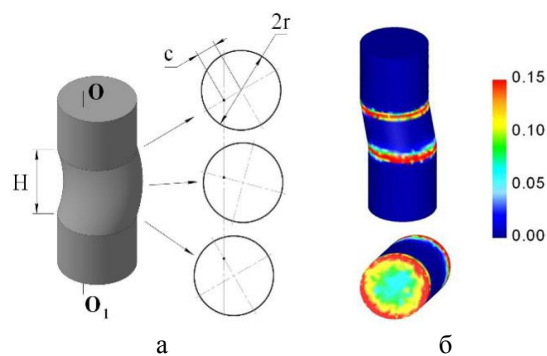


Рис. 3. Схема канала винтовой матрицы круглого сечения со смещенной осью, при $0 < c/r < 1$ (а) и поле интенсивности скорости деформации в процессе ВЭ, c^{-1} [42]

Анализ НДС заготовок показывает, что применение матриц со смещенной осью позволяет увеличить минимальную деформацию, полученную металлом при многопроходной ВЭ. Матрицы со смещенной осью существенно расширяют возможности винтовой экструзии. Прежде всего, такие матрицы позволяют обрабатывать круглые прутки. Кроме того, применение матриц со смещенной осью открывает путь к управлению распределением деформации Мизеса по сечению прутков, в частности, к практически полному ее выравниванию. Основным видом деформации при винтовой экструзии через матрицы со смещенной осью является простой сдвиг на входе и выходе винтового участка матрицы в направлениях, перпендикулярных оси экструзии. Однако отсутствие соосности между входным и выходным каналами матрицы (рис. 4) усложняет проектирование установки для ВЭ, так как приводит к появлению дополнительных моментов сил от приложения к образцу противодействия. Уравновеси-

вание этих моментов необходимо обеспечивать за счет жесткости конструктивных элементов установки для ВЭ, что усложняет конструкцию.

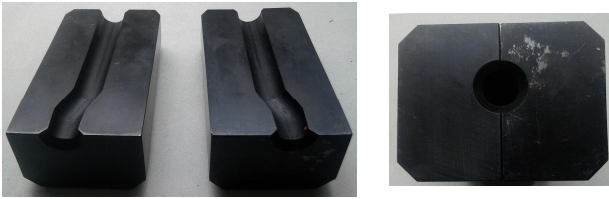


Рис. 4. Общий вид матрицы для деформации ВЭ заготовок круглого сечения

В настоящее время разработана конструкция опытно-промышленной установки, которая позволяет использовать данный вид матриц для обработки всех рассматриваемых классов материалов [44]. При этом основной задачей, которая была решена на этапах проектирования как матрицы, так и установки, являлось сохранение соосности входного и выходного участка. Для сохранения соосности разработанная винтовая матрица имеет два винтовых участка с противоположными углами закрутки и прямолинейным «транспортным» участком (рис. 5).

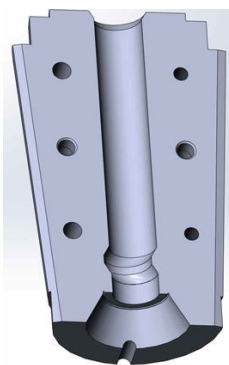


Рис. 5. Твердотельная модель винтовой матрицы для деформации ВЭ заготовок круглого сечения с соосными каналами

Угол поворота на каждом участке уменьшен, но матрица имеет несколько плоскостей простого сдвига. Конструкция винтовой матрицы, имеющей для сохранения соосности два винтовых участка, приводит к некоторому увеличению длины очага деформации. Это сопровождается ухудшением условий смазки рабочих поверхностей, ускорению их изнашивания. Расчетный анализ усилий, необходимых для деформирования заготовки круглого сечения, показал увеличение необходимого усилия прессования.

Учитывая физико-механические характеристики железоникелевых сплавов типа ЭП-718ИД, Inconel 718, винтовые матрицы для реализации процесса ВЭ заготовок из сплавов данного класса требуют совершенствования с точки зрения снижения

усилия прессования и обеспечения приемлемой для серийного типа производства долговечности работы.

В основу совершенствования матрицы положена задача снижения трения боковых поверхностей заготовки и фальш-заготовок о стенки канала контейнера и винтовой матрицы. Поставленная задача решена за счет конструктивного исполнения пуансонов и выходного канала матрицы [45]. Конструкция рабочего инструмента показана на рис. 6.

Процесс деформирования проводится в контейнере 1, снизу которого размещена винтовая матрица 2. В полости матрицы установлена нижняя фальш-заготовка 3, заготовка 4 и верхняя фальш-заготовка 5, которая передает усилие на заготовку от пуансона 6 (рис. 6). Для создания в очаге деформации необходимого уровня гидростатического давления контрпуансон 7 упирается в нижнюю фальш-заготовку 3. Он расположен в полости приемного контейнера 8, в который проводится прессование заготовки.

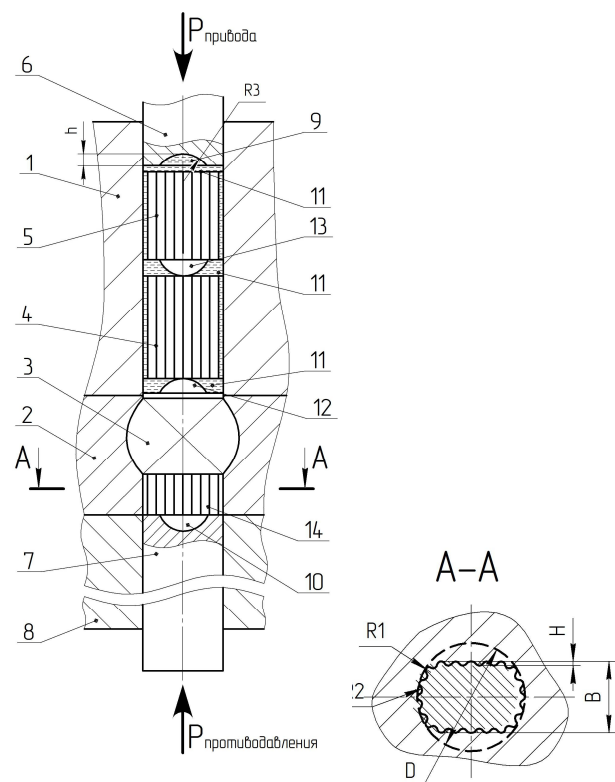


Рис. 6. Схема устройства для реализации способа многоэтапного прессования заготовок пластической средой

На рабочих торцах пуансона 6 и контрпуансона 7 выполнены сферические полости 9 и 10, которые формируют при деформировании выступы 12 и 13 на торцах фальш-заготовок. Эти выступы образуют на следующем цикле прессования полости под и над заготовкой 4, которые заполняют квазижидкой смазкой 11. На участке выхода из матрицы (калиб-

рующей части канала матрицы) выполнен рельеф в виде продольных канавок 14 глубиной H с радиусом впадин R_2 и выступов R_1 для деформирования боковых поверхностей заготовок и фальш-заготовок на выходе из матрицы.

Перед установкой заготовки 4 в контейнер 1 продольные канавки на поверхности заготовки 4 и полости 11 вокруг выступов 12 и 13 фальш-заготовок 3 и 5 заполняют смазкой. Таким образом, пространство вокруг заготовки 4 заполнено смазкой. В процессе прессования пуансон 6 перемещает верхнюю фальш-заготовку 5, заготовку 4 и нижнюю фальш-заготовку 3 вниз через матрицу 2 в приемный контейнер 8. Под действием технологического усилия и противодействия, которое создают контрпуансоном 7, пуансон и контрпуансон формируют новые выступы на торцах верхней 5 и нижней 3 фальш-заготовок соответственно. При этом исходные выступы 12 и 13 на фальш-заготовках 3 и 5 деформируются (сминаются), и смазка из полостей 11 над и под заготовкой 4 выдавливается в зазор между заготовкой 4 и каналом матрицы 2, а также в боковые канавки на поверхности заготовки 4 и фальш-заготовки 5 и зазоры относительно контейнера 1. Таким образом, поверхности заготовки 4 и фальш-заготовок 3 и 5 при перемещении относительно контейнера 1 и матрицы 2 находятся в условиях, близких к гидростатическому трению, которое снижает усилие деформирования и исключает налипание материала фальш-заготовок на поверхности контейнера 1 и матрицы 2. При этом полости 11, содержащие смазку, проходят через очаг пластической деформации и обеспечивают дополнительную смазку поверхности матрицы 2 перед и после прессования заготовки 4. В процессе деформирования боковые канавки на поверхностях заготовки 4 и фальш-заготовки 5 сминаются, и смазка выдавливается между заготовкой 4, фальш-заготовкой 5 и инструментом 1 и 2, что также снижает трение.

На выходе из канала матрицы 14 на боковых поверхностях фальш-заготовки 3 и заготовки 4 формируются продольные канавки. Затем заготовку 4 фальш-заготовку 3 выпрессовывают из приемного контейнера 8 контрпуансоном 7, заготовку переворачивают на 180° , чтобы снизить деформацию в области торцов заготовки 4, и повторяют процесс деформирования для накопления необходимой степени деформации.

Выводы

Таким образом, на основании анализа условий деформации заготовок различного класса материалов и поперечного сечения винтовой экструзией установлено, что для формирования субмикрости-

сталлической структуры в металлах и их сплавах в компактном и некомпактном состоянии рациональным является использование заготовок круглого или прямоугольного сечения. Разработаны технические решения и рекомендации по усовершенствованию технологической оснастки опытно-промышленной установки для обработки заготовок лопаток компрессора газотурбинных двигателей с применением интенсивной пластической деформации методом винтовой экструзии.

Предложена конструкция винтовой матрицы с двумя винтовыми участками с противоположными углами закрутки и прямолинейным «транспортным» участком, которая обеспечивает соосность входного и выходного каналов матрицы. Данная матрица имеет четыре плоскости простого сдвига, что интенсифицирует процесс обработки заготовок. Сохранение соосности каналов матрицы упрощает создание гидростатического давления и конструкцию установки для реализации процесса.

Применение модернизированной конструкции винтовой матрицы с продольными канавками позволяет обеспечить снижение трения боковых поверхностей заготовки и фальш-заготовок о стенки канала контейнера и винтовой матрицы, что приводит к уменьшению усилия прессования заготовок с противодействием по сравнению с матрицей без канавок. Данное техническое решение может быть применено для винтовых матриц с различным поперечным сечением винтового канала.

Литература

1. Влияние способа выплавки слитков титана на формирование субмикростикистической структуры интенсивной пластической деформацией [Текст] / Д. В. Распорня, А. В. Овчинников, В. Г. Шевченко, Т. А. Коваленко // *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. – 2014. – № 1. – С. 63-67.
2. Analysis of Submicrocrystalline Structure Formation Conditions in Iron-Nickel Alloys with Helical Extrusion [Text] / D. V. Pavlenko, D. V. Tkach, V. Yu. Kotsyuba, Ya. E. Beigel'zimer // *Metal Science and Heat Treatment*. – 2017. – Vol. 59, Issue 5-6. – P. 272–277.
3. Бейгельзимер, Я. Е. Исследование возможности уплотнения образцов из алюминиевой стружки методом винтовой экструзии [Текст] / Я. Е. Бейгельзимер, А. И. Шевелев, С. Г. Сынков // *Порошковая металлургия*. – 2004. – № 11-12. – С. 1-5.
4. Павленко, Д. В. Влияние исходного состояния титановых полуфабрикатов, подверженных интенсивной пластической деформации, на структуру и свойства [Текст] / Д. В. Павленко, А. В. Ов-

чинников // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2015. – Т. 51, № 1. – С. 50-58.

5. Перспективные материалы и технологии для деталей ротора компрессора ГТД [Текст] / Д. В. Павленко, Т. И. Прибора, Ю. В. Коцюба, С. Н. Пахолка // Авиационно-космическая техника и технология. – 2016. – Вып. 8/135. – С. 128-138.

6. Павленко, Д. В. Материаловедческие аспекты ресурсосберегающей технологии получения титановых полуфабрикатов [Текст] / Д. В. Павленко // Технологические системы. – 2013. – №4 (65). – С. 21-29.

7. Tarasov, A. F. The staticodynamic forming of powders preforms on press-hammers [Text] / A. F. Tarasov // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – 1998. – Vol. 37, Issue 7. – P. 347-350.

8. Benson, D. J. Dynamic compaction of copper powder: Computation and experiment [Text] / J. D. Benson, W. Benson, J. Nellis // Applied Physics Letters. – 1994. – № 65 (418). – P. 418-420.

9. Павленко, Д. В. Формирование субмикрорекристаллической структуры в серийных и перспективных материалах лопаток ГТД [Текст] / Д. В. Павленко, В. Ю. Коцюба, С. Н. Пахолка // Авиационно-космическая техника и технология. – 2015. – Вып. 10/127. – С. 33-39.

10. Алтухов, А. В. Систематизация процессов интенсивного пластического деформирования для формирования ультрамелкозернистых и нанокристаллических структур в объемных заготовках [Текст] / А. В. Алтухов, А. Ф. Тарасов, А. В. Периг // Письма о материалах. – 2012. – Т. 2, № 1. – С. 54-59.

11. Применение винтовой экструзии для получения субмикрорекристаллической структуры и гомогенизации титанового сплава ВТ3-1 [Текст] / Д. В. Павленко, А. В. Овчинников, А. Я. Качан, В. Г. Шевченко // Вестник двигателестроения. – 2007. – № 2. – С. 185-188.

12. Twist extrusion as a potent tool for obtaining advanced engineering materials: A review [Text] / Y. Beygelzimer, R. Kulagin, Y. Estrin, S. Laszlo, M. I. Latypov // Advanced engineering materials. – 2017. – Vol. 19, Issue 8. – P. 160-173.

13. Valiev, R. Z. Producing bulk ultrafine-grained materials by severe plastic deformation: Ten years later [Text] / R. Z. Valiev, Y. Estrin, Z. Horita // Journal of the materials. – 2016. – Vol. 68, Issue 4. – P. 1216-1226.

14. Sabirov, I. Nanostructure aluminum alloys produced by severe plastic deformation: new horizons in development [Text] / I. Sabirov, M. Yu. Murashkin, R. Z. Valiev // Materials Science & Engineering. – 2013. – Vol. 560. – P. 1-24.

15. Šnajdar, M. Musa ECAP – New consolidation method for production of aluminum matrix composites with ceramic reinforcement [Text] / M. Šnajdar, M. Musa, Z. Schauerperl // Processing and Application of Ceramics. – 2013. – № 7 (2). – P. 63-68.

16. Beygelzimer, Y. Synthesis of hybrid materials by severe plastic deformation: A new paradigm of SPD processing [Text] / Y. Beygelzimer, Y. Estrin, R. Kulagin // Advanced Engineering Materials. – 2015. – Vol. 17, № 12. – P. 1853-1861.

17. Toward architecturing of metal composites by twist extrusion [Text] / M. I. Latypov, Y. Beygelzimer, R. Kulagin, V. Varyukhin, Hyoung Seop Kim // Materials Research Letters. – 2015. – Vol. 3, № 3. – P. 161-168.

18. Producing of ultrafine grained composites with a large uniform elongation by twist extrusion: mathematical simulation [Text] / O. V. Prokof'eva, Y. Yu. Beygelzimer, R. Y. Kulagin, Y. Z. Estrin, V. N. Varyukhin // Russian Metallurgy (Metally). – 2017. – № 3. – P. 226-230.

19. Богуслаев, В. А. Модернизация прессового оборудования для реализации технологий интенсивной пластической деформации сплавов для авиационной техники [Текст] / В. А. Богуслаев, В. Ю. Коцюба, Д. В. Павленко // Технологические системы. – 2017. – № 4 (81). – С. 7-14.

20. Евстратов, В. А. Основы технологии выдавливания и конструирования штампов [Текст] / В. А. Евстратов. – Харьков : Вища школа: Изд-во при Харьк. гос. ун-те, 1987. – 143 с.

21. Sachin, G. Design analysis and overview of press tool with its defects and remedies [Text] / G. Sachin, G. Yathish Amar // International Journal of Engineering Technology, Management and Applied Sciences – 2015. – Vol. 3, Special Issue. – P. 1-10.

22. Тарасов, А. Ф. Расчет напряженно-деформированного состояния в элементах штампов с использованием пакета конечно-элементного анализа COSMOS/Works [Текст] / А. Ф. Тарасов, С. А. Короткий // Кузнечно-штамповочное производство. – 2004. – № 8. – С. 27-30.

23. Flow stress models for deformation under varying condition finite element method simulation [Text] / D. Svyetlichnyu, J. Nowak, N. Biba, Ł. Łach // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2016. – Vol. 87, Issue 1-4. – P. 543-552.

24. Тарасов, А. Ф. Влияние конструкции штампа на деформацию элементов штампового блока и рабочего инструмента штампа [Текст] / А. Ф. Тарасов, С. А. Короткий. // Кузнечно-штамповочное производство. – 2006. – № 2. – С. 34-37.

25. Мовшович, А. Я. Моделирование процессов силового нагружения базовых элементов универсально-сборной переналаживаемой оснастки [Текст] / А. Я. Мовшович, В. В. Агарков, С. А. Григоренко // Авиационно-космическая техника и технология. – 2013. – № 3 (100). – С. 42-45.

26. Тітов, В. А. Вплив форми каналу матриці на параметри процесу деформування заготовок при гвинтовому уширючому пресуванні [Текст] / В. А. Тітов, Н. К. Злочевска, О. В. Герасимова // Вісник НТУУ «КПІ». Серія машинобудування. – 2014. – № 3 (72). – С. 124-129.

27. Кулагин, Р. Ю. Совершенствование технологии и устройств винтовой экструзии на основе оценки деформированного состояния заготовок [Текст] / дис. ... канд. техн. наук : 05.03.05 : защита 06.03.14 : утв. 15.07.14 / Кулагин Роман Юрьевич. – Краматорск, 2014. – 172 с.

28. Новые схемы накопления больших пластических деформаций с использованием гидроэкструзии [Текст] / Я. Е. Бейгельзимер, В. Н. Варюхин, С. Г. Сынков, А. Н. Сапронов, В. Г. Сынков // Физика и техника высоких давлений. – 1999. – Т. 9, № 3. – С. 109-111.

29. Пат. 16486 Україна МПК В21С 29/00. Процес пресування високоміцних та низькопластичних матеріалів [Текст] / Синков С. Г., Бейгельзимер Я. Ю., Варюхін В. М., Решетов О. В. та інші ; заявник та патентовласник Донецький фізико-технічний інститут ім. О. О. Галкіна Національної академії наук України. – № u200601069 ; заявл. 06.02.2006 ; опубл. 15.08.2006, Бюл. № 8. – 7 с.

30. Головин, Ю. И. Введение в нанотехнику [Текст] : монография / Ю. И. Головин. – М. : Машиностроение, 2007. – 496 с.

31. Gaurav, C. Rathod study and analysis of press tool design [Text] / C. Gaurav, R. S. Adlinge, D. N. Raut // International Journal of Engineering Research & Technology. – 2017. – Vol. 6, Issue 7. – P. 40-45.

32. Деформационное поведение титана ВТ1-0 с субмикроструктурной структурой, полученной методом винтовой экструзии [Текст] / В. Е. Ольшевецкий, Л. П. Степанова, В. Л. Грейти, Д. В. Павленко, Д. В. Ткач // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2013. – № 11. – С. 29-33.

33. Павленко, Д. В. Методика оптимизации канала матрицы для винтовой экструзии заготовок [Текст] / Д. В. Павленко // Журнал инженерных наук. – 2015. – Т. 2, № 1. – С. 8-15.

34. Beygelzimer, Y. Twist extrusions plus spread extrusion = spatial uniformity [Text] / Y. Beygelzimer, A. Reshetov // Ultrafine Grained Materials. – 2006. – № 4. – P. 119-124.

35. Pavlenko, D. V. Vortices in noncompact blanks during twist extrusion [Text] / D. V. Pavlenko, Y. E. Beygelzimer // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – 2016. – Vol. 54, № 9-10. – P. 517-524.

36. Cross flow during twist extrusion: Theory, experiment, and application [Text] / R. Kulagin, M. I. Latypov, H. S. Kim, Y. Beygelzimer // Metallurgical and Materials Transactions. – 2013. – Vol. 44a. – P. 3211-3220.

37. Позняк, Л. А. Инструментальные стали. Справочник [Текст] / Л. А. Позняк. – М. : Металлургия, 1977. – 168 с.

38. Обработка титановых сплавов давлением [Текст] / Г. Е. Мажарова, А. З. Комановский, В. Б. Чечулин, С. Ф. Важецин. – М. : Металлургия, 1977. – 96 с.

39. Павленко, Д. В. Влияние термического воздействия на структуру и свойства титанового

сплава ВТ8М в субмикроструктурном состоянии [Текст] / Д. В. Павленко, Т. А. Коваленко, А. В. Овчинников // Технологические системы. – 2016. – № 1. – С. 60-67.

40. Пат. №71855 Україна, МПК (2012.01) В 21 С 25/00. Роз'ємна матриця для гвинтової екструзії [Текст] / Бейгельзимер Я. Ю., Тарасов О. Ф., Кулагин Р. Ю. ; заявник та патентовласник Бейгельзимер Я. Ю., Тарасов О. Ф., Кулагин Р. Ю. – № u201201260 ; заявл. 07.02.2012 ; опубл. 25.07.2012, Бюл. № 14. – 6 с.

41. Винтовая экструзия прутков круглого сечения в матрицах со смещенной осью [Текст] / Я. Е. Бейгельзимер, Р. Ю. Кулагин, Ю. В. Гусар, Д. В. Прилепо, В. Н. Варюхин // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2014. – № 6. – С. 22-29.

42. Off-axis twist extrusion for uniform processing of round bars [Text] / Y. Beygelzimer, R. Kulagin, M. I. Latypov, V. Varyukhin, H. S. Kim // Metals and Materials International. – 2015. – Vol. 21, № 4. – P. 734-740.

43. Beygelzimer, Y. Useful properties of twist extrusion [Text] / Y. Beygelzimer, V. Varyukhin, S. Synkov, D. Orlov // Materials Science and Engineering. – 2009. – Vol. 503. – P.14-17.

44. Пат. 104922 Україна, МПК В21D 22/02 (2006.01). Штамп для пресування заготовок з протитиском [Текст] / Тарасов О. Ф., Бейгельзимер Я. Ю., Павленко Д. В., Коцюба В. Ю. ; заявник та патентовласник Тарасов О. Ф., Бейгельзимер Я. Ю., Павленко Д. В., Коцюба В. Ю. – № u201508328 ; заявл. 25.08.2015 ; опубл. 25.02.2016, Бюл. № 4. – 4 с.

45. Пат. 110125 Україна, МПК В21D 22/02 (2006.01), В21С 23/32 (2016.01) В21J 5/00. Спосіб багатоступенятого пресування заготовок пластичним середовищем (фальш-заготовкою) [Текст] / Тарасов О. Ф., Бейгельзимер Я. Ю., Павленко Д. В. ; заявник та патентовласник Тарасов О. Ф., Бейгельзимер Я. Ю., Павленко Д. В. – № u201603315 ; заявл. 30.03.2016 ; опубл. 26.09.2016, Бюл. № 18. – 5 с.

References

1. Raspornya, D. V., Ovchinnikov, A. V., Shevchenko, V. G., Kovalenko, T. A. Vliyanie sposoba vyplavki slitkov titana na formirovanie submikrokristallicheskoj struktury intensivnoi plasticheskoj deformatsiei [Influence of the method of melting titanium ingots on the formation of a submicrocrystalline structure by intense plastic deformation]. *Novi materiali i tekhnologii v metalurgii ta mashinobuduvanni*, 2014, no. 1, pp. 63-67.

2. Pavlenko, D. V., Tkach, D. V., Kotsyuba, V. Yu., Beigelzimer, Ya. E. Analysis of Submicrocrystalline Structure Formation Conditions in Iron-Nickel Alloys with Helical Extrusion. *Metal Science and Heat Treatment*, 2017, no. 59, pp. 272-277.

3. Beigelzimer, Ya. E., Shevelev, A. I., Synkov, S. G. Issledovanie vozmozhnosti uplotneniya obrabotsov

iz alyuminievoi struzhki metodom vintovoi ekstruzii [Investigation of the possibility of compacting of samples from aluminum chips by the method of screw extrusion]. *Poroshkovaya metallurgiya*, 2004, no. 11-12, pp. 1-5.

4. Pavlenko, D. V., Ovchinnikov, A. V. Vliyanie iskhodnogo sostoyaniya titanovykh polufabrikatov, podverzhennykh intensivnoi plasticheskoj deformatsii, na strukturu i svoystva [Influence of the initial state of titanium semi-finished products subject to severe plastic deformation on the structure and properties]. *Fiziko-khimichna mekhanika materialiv*, 2015, no. 1, pp. 50-58.

5. Pavlenko, D. V., Pribora, T. I., Kotsyuba, Yu. V., Pakholka, S. N. Perspektivnye materialy i tekhnologii dlya detalei rotora kompressora GTD [Perspective materials and technologies for the rotor parts of the GTE compressor]. *Aviacijno-kosmichna tehnika i tehnologia - Aerospace technic and technology*, 2016, no. 8/135, pp. 128-138.

6. Pavlenko, D. V. Materialovedcheskie aspekty resursosberegayushchei tekhnologii polucheniya titanovykh polufabrikatov [Material science aspects of resource-saving technology for production of titanium semifinished products]. *Tekhnologicheskie sistemy*, 2013, no. 4(65), pp. 21-29.

7. Tarasov, A. F. The staticodynamic forming of powders preforms on press-hammers. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 1998, no. 37, pp. 347-350.

8. Benson, D. J., Nellis, W. J. Dynamic compaction of copper powder: Computation and experiment. *Applied Physics Letters*, 1994, no. 65 (418), pp. 418-420.

9. Pavlenko, D. V., Kotsyuba, V. Yu., Pakholka, S. N. Formirovanie submikrokristallicheskoj struktury v seriiynykh i perspektivnykh materialakh lopatok GTD [Formation of submicrocrystalline structure in serial and advanced materials of GTE gas turbine blades]. *Aviacijno-kosmichna tehnika i tehnologia - Aerospace technic and technology*, 2015, no. 10/127, pp. 33-39.

10. Altukhov, A. V., Tarasov, A. F., Perig, A. V. Sistematizatsiya protsessov intensivnogo plasticheskogo deformirovaniya dlya formirovaniya ul'tramelkozernistykh i nanokristallicheskikh struktur v ob'emnykh zagotovkakh [Systematization of intensive plastic deformation processes for the formation of ultrafine-grained and nanocrystalline structures in bulk billets]. *Pis'ma o materialakh*, 2012, no. 1, pp. 54-59.

11. Pavlenko, D. V., Ovchinnikov, A. V., Kachan, A. Ya., Shevchenko, V. G. Primenenie vintovoi ekstruzii dlya polucheniya submikrokristallicheskoj struktury i gomogenizatsii titanovogo splava VT3-1 [The use of twist extrusion to obtain a submicrocrystalline structure and homogenize the titanium alloy VT3-1]. *Vestnik dvigatelestroeniya*, 2007, no. 2, pp. 185-188.

12. Beygelzimer, Y., Kulagin, R., Estrin, Y., Laszlo, S., Latypov, M. I. Twist Extrusion as a Potent Tool for Obtaining Advanced Engineering Materials: A Review. *Advanced engineering materials*, 2017, no. 19, pp. 160-173.

13. Valiev, R. Z., Estrin, Y., Horita, Z. Producing Bulk Ultrafine-Grained Materials by Severe Plastic Deformation: Ten Years Later. *Journal of the materials*, 2016, no. 68, pp. 1216-1226.

14. Sabirov, I., Murashkin, M. Yu., Valiev, R. Z. Nanostructure aluminum alloys produced by severe plastic deformation: new horizons in development. *Materials Science & Engineering*, 2013, no. 560, pp. 1-24.

15. Šnajdar, M., Musa, M., Schauerl, Z. Musa ECAP – New consolidation method for production of aluminium matrix composites with ceramic reinforcement. *Processing and Application of Ceramics*, 2013, no. 7(2), pp. 63-68.

16. Beygelzimer, Y., Estrin, Y., Kulagin, R. Synthesis of Hybrid Materials by Severe Plastic Deformation: A New Paradigm of SPD Processing. *Advanced Engineering Materials*, 2015, no. 12, pp. 1853-1861.

17. Latypov, M. I., Beygelzimer, Y., Kulagin, R., Varyukhin, V., Kim, H. S. Toward architecturing of metal composites by twist extrusion. *Materials Research Letters*, 2015, no. 3, pp. 161-168.

18. Prokofeva, O. V., Beygelzimer, Y. Y., Kulagin, R. Y., Estrin, Y. Z., Varyukhin, V. N. Producing of ultrafine grained composites with a large uniform elongation by twist extrusion: mathematical simulation. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2017, no. 3, pp. 226-230.

19. Boguslaev, V. A., Kotsyuba, V. Yu., Pavlenko, D. V. Modernizatsiya pressovogo oborudovaniya dlya realizatsii tekhnologii intensivnoi plasticheskoj deformatsii splavov dlya aviatsionnoi tekhniki [Modernization of press equipment for the implementation of severe plastic deformation of alloys for aircraft]. *Tekhnologicheskie sistemy*, 2017, no. 4(81), pp. 7-14.

20. Evstratov, V. A. *Osnovy tekhnologii vydavli-vaniya i konstruirovaniya shtampov* [Basics of extrusion and stamping technology]. Kharkov, Vishcha shkola Publ., 1987. 143 p.

21. Sachin, G., Amar, G. Ya. Design analysis and overview of press tool with its defects and remedies. *International Journal of Engineering Technology, Management and Applied Sciences*, 2015, no. 3, pp. 1-10.

22. Tarasov, A. F., Korotkii, S. A. Raschet napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya v elementakh shtampov s ispol'zovaniem paketa konechno-elementnogo analiza COSMOS/Works [Calculation of the stress-strain state in the elements of dies using the finite element analysis package COSMOS/Works]. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo*, 2004, no. 8, pp. 27-30.

23. Svyetlichnyy, D., Nowak, J., Biba, N., Lach, L. Flow stress models for deformation under varying condition finite element method simulation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, no. 87, pp. 543-552.

24. Tarasov, A. F., Korotkii, S. A. Vliyanie konstruksii shtampa na deformatsiyu elementov shtampovogo bloka i rabochego instrumenta shtampa [The effect of the die design on the deformation of the elements of the die block and the working tool of the

stamp] *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo*, 2006, no. 2, pp. 34-37.

25. Movshovich, A. Ya., Agarkov, V. V., Grigorenko, S. A. Movshovich A. Ya. Modelirovanie protsessov silovogo nagruzheniya bazovykh elementov universal'no-sbornoi perenalazhivaemoi osnastki [Modeling of the processes of force loading of basic elements of a universally assembled reconfigurable tooling]. *Aviacionno-kosmichna tehnika i tehnologia - Aerospace technic and technology*, 2013, no. 3 (100), pp. 42-45.

26. Titov, V. A., Zlochevska, N. K., Gerasimova, O. V. Vpliv formi kanalu matritsi na parametri protsesu deformuvannya zagotovok pri gvintovomu ushiryayuchomu presuvanni [The effect of the channel form of the matrix on the parameter of the deformation process of the blanks during the screw broadening]. *Visnik NTUU «KPI». Seriya mashinobuduvannya*, 2014, no. 3 (72), pp. 124-129.

27. Kulagin, R. Yu. *Sovershenstvovanie tekhnologii i ustroystv vintovoi ekstruzii na osnove otsenki deformirovannogo sostoyaniya zagotovok*. Diss. kand. techn. nauk. [Perfection of technology and devices of screw extrusion on the basis of evaluation of the deformed state of blanks. Phil. Dr. diss.]. Kramatorsk, 2014. 172 p.

28. Beigel'zimer, Y. E., Varyukhin, V. N., Synkov, S. G., Sapronov, A. N., Synkov, V. G. Novye skhemy nakopleniya bol'shikh plasticheskikh deformatsii s ispol'zovaniem gidroekstruzii [The new schemes of accumulation of large plastic strains using hydroextrusion]. *Fizika i tehnika vysokikh davlenii*, 1999, no. 3, pp. 109-111.

29. Sinkov, S. G., Beigel'zimer, Ya. Yu., Varyukhin, V. M., Reshetov, O. V. *Protses presuvannya visokomitsnikh ta niz'koplastichnikh materialiv* [The pressing process of high-strength and low-plastic materials]. Patent Ukraine, № 16486, 2006.

30. Golovin, Yu. I. *Vvedenie v nanotekhniku* [Introduction to nanotechnology]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2007. 496 p.

31. Gaurav, C. R., Samadhan, A., Raut, D. N. Study and analysis of press tool design. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 2017, no. 6, pp. 40-45.

32. Ol'shanetskii, V. E., Stepanova, L. P., Gresha, V. L., Pavlenko, D. V., Tkach, D. V. Deformatsionnoe povedenie titana VT1-0 s submikrokristallicheskoj strukturoi, poluchenoj metodom vintovoi ekstruzii [The deformation behavior of titanium VT1-0 with submicrocrystalline structure obtained by the screw extrusion method]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2013, no. 11, pp. 29-33.

33. Pavlenko, D. V. Metodika optimizatsii kanala matritsi dlya vintovoi ekstruzii [The technique for opti-

mizing the channel of matrix for twist extrusion]. *Zhurnal inzhenernykh nauk*, 2015, no. 1, pp. 8-15.

34. Beygelzimer, Y., Reshetov, A. Twist extrusions plus spread extrusion = spatial uniformity. *Ultrafine Grained Materials*, 2006, no. 4, pp. 119-124.

35. Pavlenko, D. V., Beygel'zimer, Ya. E. Vortices in noncompact blanks during twist extrusion. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 2016, no. 9-10, pp. 517-524.

36. Kulagin, R., Latypov, M. I., Kim, H. S., Beygelzimer, Y. Cross flow during twist extrusion: Theory, experiment, and application. *Metallurgical and Materials Transactions*, 2013, no. 44a, pp. 3211-3220.

37. Poznyak, L. A. *Instrumental'nye stali*. Spravochnik [Tool steel. Directory]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1977. 168 p.

38. Mazharova, G. E., Komanovskii, A. Z., Chechulin, V. B., Vazhetsin, S. F. *Obrabotka titanovykh splavov davleniem* [Treatment of titanium alloys by pressure]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1977. 96 p.

39. Pavlenko, D. V., Kovalenko, T. A., Ovchinnikov, A. V. Vliyanie termicheskogo vozdeistviya na strukturu i svoystva titanovogo splava VT8M v submikrokristallicheskom sostoyanii [Effect of thermal action on the structure and properties of the titanium alloy VT8M in the submicrocrystalline state]. *Tekhnologicheskie sistemy*, 2016, no. 1, pp. 60-67.

40. Beigel'zimer, Ya. Yu., Tarasov, O. F., Kulagin, R. Yu. *Roz'yemna matritsya dlya gvintovoi ekstruzii* [Split matrix for twist extrusion]. Patent Ukraine, № 71855, 2012.

41. Beigel'zimer, Y. E., Kulagin, R. Yu., Gusar, Yu. V., Prilepo, D. V., Varyukhin, V. N. Vintovaya ekstruziya prutkov kruglogo secheniya v matritsakh so smeshchennoi os'yu [Twist extrusion of round cross bars in displaced axis matrix]. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem*, 2014, no. 6, pp. 22-29.

42. Beygelzimer, Y., Kulagin, R., Latypov, M. I., Varyukhin, V., Kim, H. S. Off-Axis twist extrusion for uniform processing of round bars. *Metals and Materials International*, 2015, no. 4, pp. 734-740.

43. Beygelzimer, Y., Varyukhin, V., Synkov, S., Orlov, D. Useful properties of twist extrusion. *Materials Science and Engineering*, 2009, no. 503, pp. 14-17.

44. Tarasov, O. F., Beigel'zimer, Ya. Yu., Pavlenko, D. V., Kotsyuba, V. Yu. *Shtamp dlya presuvannya zagotovok z protitiskom* [Stamp for pressing blanks with counterweight]. Patent Ukraine, № 104922, 2016.

45. Tarasov, O. F., Beigel'zimer, Y. Yu., Pavlenko, D. V. *Sposib bagatoetapnogo presuvannya zagotovok plastichnim seredovishchem (fal'shzagotovkoyu)* [Method of multi-stage pressing of preforms by plastic medium (false-baking)]. Patent Ukraine, № 110125, 2016.

КОНСТРУКТИВНІ АСПЕКТИ ПРОЕКТУВАННЯ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЇ ОСНАЩЕННЯ ДЛЯ ГВИНТОВОЇ ЕКСТРУЗІЇ

Д. В. Павленко, О. Ф. Тарасов, Я. Ю. Бейгельзімер, В. Ю. Коцюба

Розглянуто особливості проектування і експлуатації штампів для обробки металів тиском з погляду особливостей конструкції та умов роботи оснащення для інтенсивної пластичної деформації заготовок методом гвинтової екструзії. На підставі аналізу необхідних режимів деформування титанових і залізникелевих сплавів встановлено вимоги до конструкції матриць, матеріалам для їх виготовлення, змазуючо-технологічним середовищам, а також умовам роботи гвинтових матриць. Запропоновані рекомендації з розробки раціональної конструкції технологічного оснащення для деформації заготовок гвинтові екструзією. в умовах серійного виробництва. На їх підставі запропоновано технічні рішення та конструктивні заходи щодо вдосконалення конструкції технологічного оснащення для реалізації процесу гвинтової екструзії високоміцних сплавів для авіаційної техніки. Показано приклади розроблених різних конструкційних схем реалізації гвинтових матриць.

Ключевые слова: інтенсивна пластична деформація, гвинтова екструзія, матриця, пуансон, заготовка, титановий сплав, залізникелевий сплав.

THE CONSTRUCTIVE ASPECTS OF DESIGN AND OPERATION OF THE ACCESSORIES FOR TWIST EXTRUSION

D. V. Pavlenko, A. F. Tarasov, Y. Yu. Beygelzimer, V. Yu. Kotsiuba

The present paper introduces a twist extrusion (TE) process and special equipment capable of processing of round and prismatic bars with uniform deformation and reports analytical, and numerical modeling of the process. It is shown that the ability to treat round bars can be achieved by design of special off-axis TE dies in which the axis of the twist surface is displaced from the central axis of the bar being processed. Analytical model developed in the present study explains why using off-axis TE dies leads to uniform deformation and how this deformation uniformity depends on the die geometry. The main conclusions made upon analytical modeling are confirmed with complement finite element simulations. The simulations also show that the main deformation mode in off-axis TE is simple shear at the intersection planes between the twist and the straight channels of the die. Features of design and operation of dies for metal working with pressure from the point of view of design features and working conditions of equipment for severe plastic deformation of blanks by TE are considered. Based on the analysis of required modes of deformation of titanium and iron-nickel alloys, the requirements for the construction of matrices, materials for their manufacture, lubricating-technological environments, as well as the working conditions of the twist matrices. Recommendations are proposed for the development of a rational design of technological equipment for deformation of blanks by twist extrusion in a batch production. On their basis, technical solutions and constructive measures to improve the design of the tooling for the process of twist extrusion of high-strength alloys for aircraft engineering are proposed. Examples of developed various structural schemes for the implementation of twist matrices are shown. It is shown that a matrix with grooves in a screw channel evolves into a promising construction of the matrix for the realization of screw extrusion of blanks of different sections. This allows to reduce friction between the blank, the counter-blanks and the matrix. The developed equipment for severe plastic deformation by TE can be used for technological processes of processing different aviation alloys and technological process of high-effectiveness titanium materials producing from powders.

Keywords: severe plastic deformation, twist extrusion, matrix, punch, blank, titanium alloy, iron-nickel alloy.

Павленко Дмитрій Вікторович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри технології авіаційних двигателів Запорозького національного технічного університета, e-mail: dvp1977dvp@gmail.com.

Тарасов Александр Федорович – д-р техн. наук, проф. завідує кафедрою Донбасської державної машинобудівної академії, e-mail: alexandrtar50@gmail.com.

Бейгельзімер Ян Ефимович – д-р техн. наук, проф. Донецького фізико-технічного інституту ім. А. А. Галкіна НАН України, e-mail: yanbeygel@gmail.com.

Коцюба Віктор Юрьевич – заступник технічного директора АО "МОТОР СІЧ", e-mail: dvp_zntu@ukr.net.

Pavlenko Dmytro – PhD, associate professor, docent, Zaporizhzhya National Technical University, Aircraft engines technologies department, e-mail: dvp1977dvp@gmail.com.

Tarasov Olexsandr – Dr.Sc., PhD, head of the department of Donbass State Machine-Building Academy, e-mail: alexandrtar50@gmail.com.

Beygelzimer Yakov – Dr.Sc., PhD, Donetsk Institute for Physics and Engineering named after A. Galkin of the National Academy of Sciences of Ukraine, e-mail: yanbeygel@gmail.com.

Kotsiuba Viktor – JSC "MOTOR SICH" deputy of the technical director, e-mail: dvp_zntu@ukr.net.