

PACS: 81.40.-z

О.В. Прокофьева, Ю.В. Возняк, Д.В. Прилепо

ОСОБЕННОСТИ ПЛАСТИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ И ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ МЕТОДОМ ПЛОСКОЙ ВИНТОВОЙ ЭКСТРУЗИИ

Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина НАН Украины
ул. Р. Люксембург, 72, г. Донецк, 83114, Украина

Статья поступила в редакцию 26 ноября 2012 года

На примере алюминиевого сплава АД1 и полиамида-6 (ПА-6) рассмотрено пластическое течение металлических и полимерных материалов при интенсивной пластической деформации (ИПД), реализуемой методом плоской винтовой экструзии (ПВЭ). Показано, что эффект перетекания, обусловленный наличием «сквозной» и «сдвиговой» составляющих пластического течения материала, выражен сильнее в случае металла по сравнению с полимером. Выявлены различия в характере распределения твердости по поперечному сечению исследуемых экструдатов.

Ключевые слова: интенсивная пластическая деформация, пластическое течение, плоская винтовая экструзия, алюминиевые сплавы, полиамид-6

На прикладі алюмінієвого сплаву АД1 і поліаміду-6 розглянуто пластичний плин металевих і полімерних матеріалів при інтенсивній пластичній деформації, реалізованій плоскою гвинтовою екструзією. Показано, що ефект перетікання, обумовлений наявністю «наскрізної» й «зсувної» складових пластичного плину матеріалу, виражений сильніше в разі металу в порівнянні з полімером. Виявлено відмінності в характері розподілу твердості по поперечному перерізу досліджуваних екструдатів.

Ключові слова: інтенсивна пластична деформація, пластичний плин, плоска гвинтова екструзія, алюмінієві сплави, поліамід-6

Введение

В настоящее время хорошо известны перспективы, которые открывают наноструктурные материалы с принципиально новым комплексом свойств в различных отраслях промышленности. Обнаружен ряд обусловленных наноструктурой аномалий электрических, магнитных и механических свойств материалов. Для формирования наноструктур разработаны многочисленные способы, среди которых свою эффективность показали методы ИПД, осно-

ванные на одновременном действии высокого давления и деформации простым сдвигом. Применение методов ИПД для обработки металлических материалов приводит к фрагментации зеренной структуры и формированию границ с высокоугловыми разориентировками [1]. В случае кристаллизующихся полимеров процессы ИПД могут обеспечивать формирование однородной, фрагментированной надмолекулярной структуры, повышение степени совершенства и толщины кристаллических ламелей, а также управляемую молекулярную ориентацию [2,3].

Свойства получаемого ИПД-материала и однородность их распределения по объему заготовки во многом определяются характеристиками пластического течения в процессе деформирования. Знание закономерностей этого течения позволит управлять формированием структуры и, как следствие, получать требуемый комплекс свойств в обрабатываемом материале.

В настоящей работе по результатам исследований проведен анализ особенностей пластического течения полимерного и металлического материалов при ИПД методом плоской винтовой экструзии.

Выбор метода обработки ИПД

Одним из известных процессов ИПД является винтовая экструзия (ВЭ) [4]. Ее недостатки, общие для большинства методов ИПД (относительно небольшие размеры обрабатываемых заготовок, дискретность процесса обработки, а в случае металлов – жесткие условия контактного трения), сведены к минимуму в модификации процесса, реализующего полунепрерывную обработку длинномерных заготовок, – плоской винтовой экструзии [5,6].

ПВЭ представляет собой продвижение заготовки через матрицу сложной формы с двумя плоскими и двумя линейчатыми поверхностями (рис. 1,а),

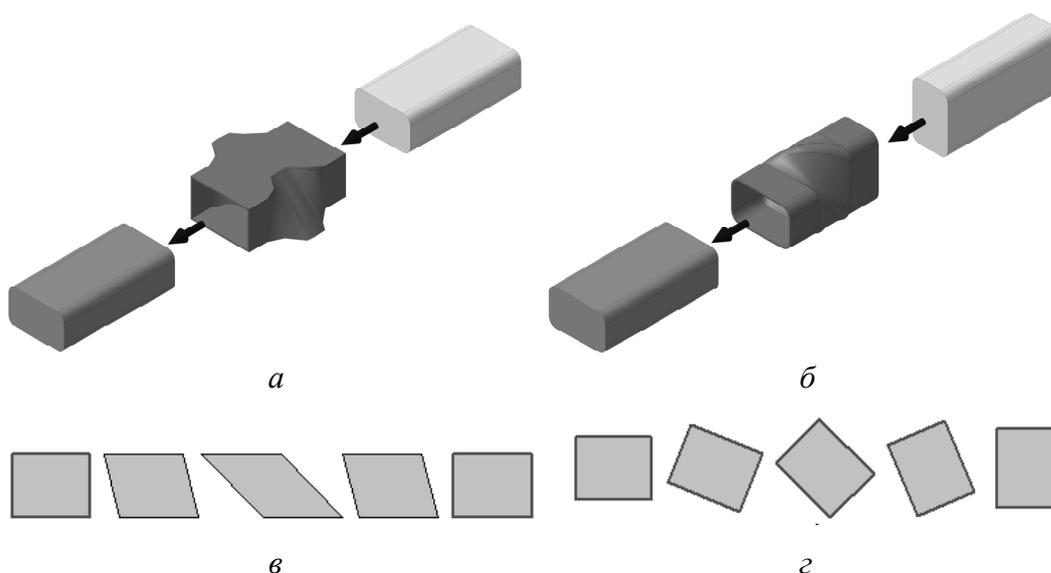


Рис. 1. Схемы процессов ПВЭ (а), ВЭ (б) и последовательные сечения каналов матриц при ПВЭ (в) и ВЭ (г)

причем подвижные плоские стенки матрицы обеспечивают прессование с активным действием сил трения. Этот метод ИПД позволяет реализовать равноканальный процесс деформирования заготовки в поперечном сечении по схеме простого сдвига и увеличить (по сравнению с ВЭ) длину обрабатываемых заготовок.

На рис. 1 для наглядности сопоставлены процессы ПВЭ и ВЭ – их схемы, последовательные сечения каналов матриц и вид деформируемых заготовок. Если для ВЭ характерны зоны интенсивной деформации на входе и выходе из винтового канала матрицы, на которые приходятся «закрутка» и «раскрутка» заготовки, и между которыми она продвигается без деформации, то в случае ПВЭ эти зоны распределены по всей матрице и разделяют ее пополам. В первой половине ПВЭ-матрицы заготовка, по аналогии с «закруткой» при ВЭ, совершает наклон, обеспечивая тем самым деформацию по схеме простого сдвига, а во второй половине матрицы заготовка выпрямляется, что соответствует «раскрутке» при ВЭ.

Исследования [6,7] показали, что ВЭ и ПВЭ дают сопоставимые значения накопленной деформации с отличием лишь в характере ее распределения по сечению заготовки. Для обоих процессов характерно интенсивное перемешивание деформируемого материала на микроуровне при его отсутствии на макроуровне. При этом ПВЭ позволяет обрабатывать заготовки с большим отношением длины к поперечному размеру по сравнению с ВЭ, а применение подвижных стенок матрицы позволяет пользоваться преимуществами активного трения, снижая тем самым нагрузку на инструмент.

Таким образом, ПВЭ, обладая определенными преимуществами, сохраняет основные характеристики традиционной ВЭ, что дает возможность использовать полученные знания о ВЭ, учитывая при этом присущие ПВЭ особенности.

Методика проведения эксперимента

Экспериментальные исследования выполняли на заготовках из литого алюминиевого сплава АД1 (Al – 99.30%, Cu < 0.05, Mg < 0.05, Mn < 0.025, Fe < 0.30, Si < 0.30, Zn < 0.1, Ti < 0.15%, другие примеси < 0.7%) и кристаллизующегося полимера ПА-6. Заготовки имели размеры 25 × 40 mm в прямоугольном сечении и длину 70 mm. Деформацию ПВЭ осуществляли без противодействия при температуре 150°C и скорости движения пуансона 3.0 mm/s. В качестве смазки использовали расплав смеси солидола и воска. Рабочей средой для передачи давления от инструмента к заготовке служил мелкодисперсный графит.

Перед ПВЭ по методике, описанной в [8], в торец исходного образца на глубину 20 mm, достаточную для исключения влияния нестационарного пластического течения, были введены метки-волокна (рис. 2). Для алюминиевой заготовки использовали метки из меди, а для полиамидной – из того же полимера. После деформации нестационарный участок заготовки срезали,

ее торец шлифовали, производили сканирование и оцифровку координат расположения меток. В качестве координат положения метки использовали координаты центра тяжести фигуры, образованной контуром волокна.

Результаты и обсуждение

Полученные результаты представлены на рис. 3. Для металла можно видеть некоторое искажение виртуального прямоугольника, построенного по исходным положениям меток (рис. 3,д). В полимерной заготовке это искажение выражено в значительно меньшей степени (рис. 3,е). Численный анализ данных оцифровки фотографий показал, что среднее по сечению отклонение меток от исходного положения $\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sqrt{(x_{0_i} - x_{1_i})^2 + (y_{0_i} - y_{1_i})^2}\right)$, где $n = 9$ – количество меток в сечении, (x_0, y_0) , (x_1, y_1) – координаты меток соответственно до и после ПВЭ) для алюминия составляет 2.2, тогда как для полиамида – 1.5.

Подобное искажение в поперечном сечении заготовки характерно и для процесса ВЭ. Оно связывается с наличием так называемого перетекания – движения материальных точек внутри контура поперечного сечения [4]. Перетекание дополняет чисто винтовое течение материала и в совокупности с ним обеспечивает сохранение постоянного объема деформируемого образца. Выражение для поля скоростей течения \mathbf{V} при ВЭ имеет две составляющие:

$$\mathbf{V} = \mathbf{V}_1 + \mathbf{V}_2, \quad (1)$$

где \mathbf{V}_1 описывает «винтовое течение» материала, т.е. движение поперечного сечения заготовки как целого, а \mathbf{V}_2 является отклонением \mathbf{V} от \mathbf{V}_1 и связывается с перетеканием материала в поперечном сечении заготовки.

Воспользовавшись близостью процессов ВЭ и ПВЭ, полученные результаты можно объяснить на основе следующих представлений о природе перетекания. При ВЭ кинематически возможны два предельных варианта пластического течения. Первый описывается «винтовым» полем, а второй представляет собой течение вдоль оси экструзии с преодолением выступов винтовой поверхности как препятствий – «сквозное» течение.

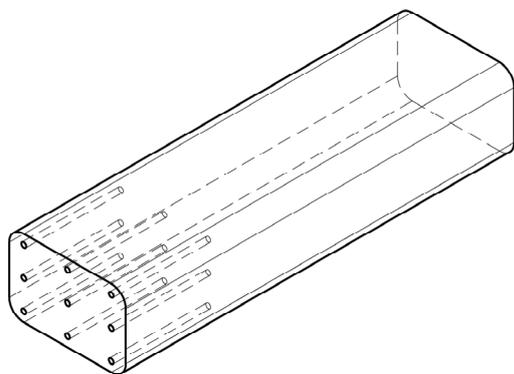


Рис. 2. Схема заготовки для эксперимента

При «винтовом» течении деформация материала происходит лишь на входе и выходе из винтового участка матрицы, а внутри него заготовка движется, как винт в гайке, без деформации, испытывая лишь трение о поверхность матрицы. При «сквозном» течении деформация заготовки происходит на всем протяжении матрицы, а материальные точки движутся вдоль контактной поверхности по кратчайшим путям,

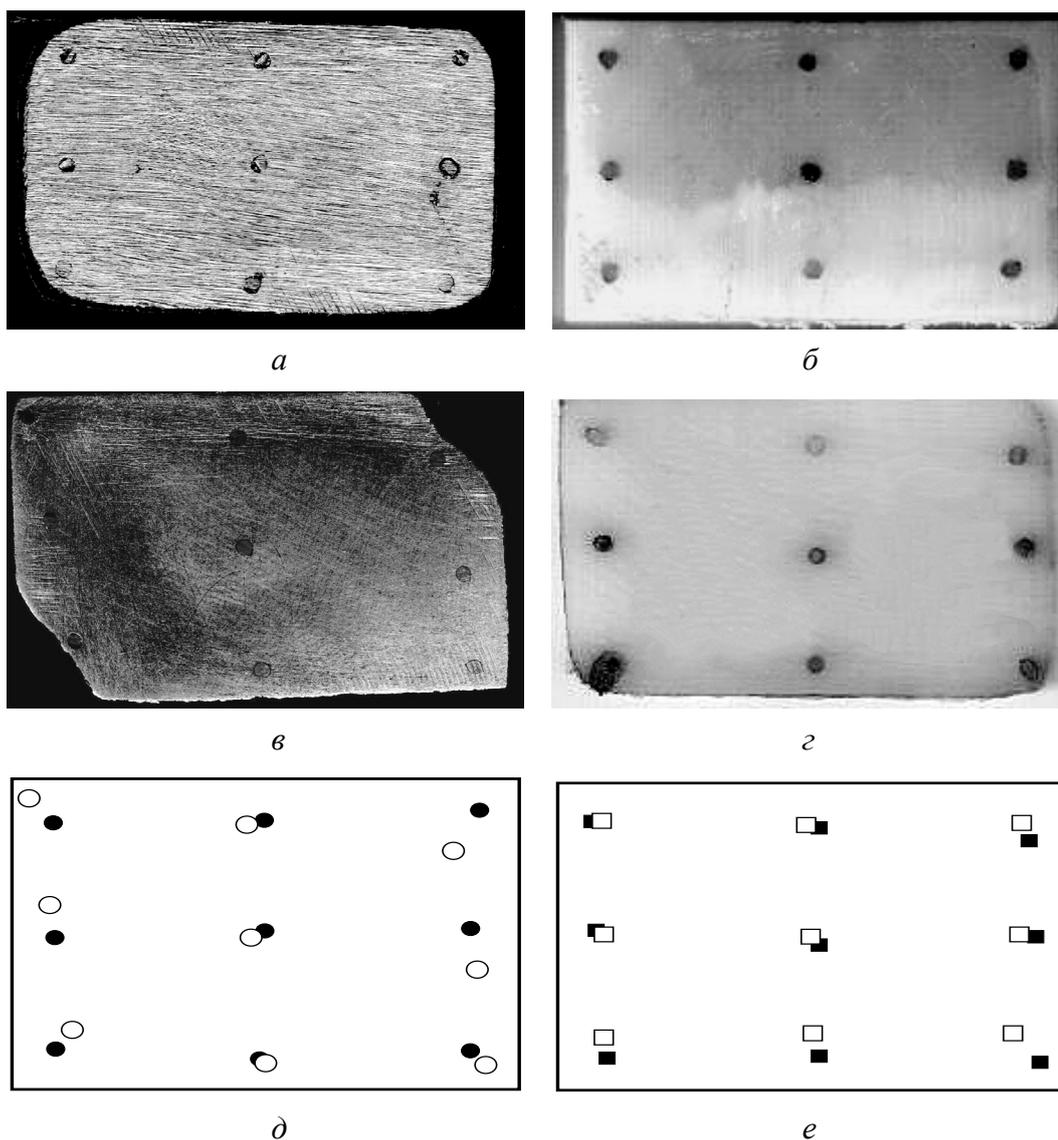


Рис. 3. Поперечные сечения алюминиевой (*a, в*) и полиамидной (*б, з*) заготовок в исходном состоянии (*a, б*) и после одного прохода ПВЭ (*в, з*); сопоставление положений меток до (сплошные маркеры) и после (пустые маркеры) ПВЭ (*д, е*)

поэтому работа сил трения меньше, чем в первом случае. Как правило, при ВЭ периферийные участки заготовки, следуя за геометрией канала винтовой матрицы, реализуют «винтовое» течение, тогда как центральная ее часть стремится пройти сквозь канал, огибая его внутренние выступы и реализуя тем самым «сквозное» течение. В результате суперпозиции этих двух течений центральная область заготовки несколько запаздывает относительно периферийных участков, и происходит упомянутое выше перетекание материала в поперечном сечении заготовки.

Аналогичная ситуация наблюдается и для процесса ПВЭ. В данном случае вместо «винтового» течения имеет место «сдвиговое», при котором периферийные точки заготовки совершают наклон, следуя за геометрией канала. При

этом для центральной части так же, как в случае ВЭ, характерно «сквозное» течение. Суперпозиция «сквозного» и «сдвигового» течений обеспечивает наблюдаемое на рис. 3,д,е перетекание в поперечном сечении заготовки.

По аналогии с ВЭ поле скоростей V при ПВЭ можно рассматривать как взвешенную сумму вышеупомянутых кинематически-возможных полей:

$$V = (1 - \lambda)V_1 + \lambda V_3, \quad (2)$$

где V_3 – составляющая поля, отвечающая за «сквозное» течение; λ – весовой коэффициент, изменяющийся в пределах от 0 до 1. В случае, когда λ принимает свои граничные значения 0 и 1, поле скоростей V вырождается соответственно в V_1 или V_3 , а для промежуточных значений λ поле V представляет собой их суперпозицию.

Из соотношений (1) и (2) можно получить выражение для скорости перетекания:

$$V_2 = \lambda(V_3 - V_1), \quad (3)$$

из которого следует, что она линейно зависит от весового коэффициента λ .

О наличии перетекания при ПВЭ косвенно свидетельствуют измерения прочностных свойств обработанных материалов. Так, для ВЭ-металлов было показано [4,9], что перетекание (благодаря составляющей «сквозного» течения) обеспечивает деформацию приосевой зоны заготовки. При ПВЭ центральная зона также имеет ненулевую деформацию, на что указывает повышение твердости обработанного алюминия в этой зоне (рис. 4). Наиболее сильно перетекание выражено на периферии металлической заготовки ввиду преобладания там «сдвигового» течения. Из сопоставления рис. 4,б и рис. 3,д видно, что областям с максимальными значениями твердости соответствуют наибольшие по сечению отклонения меток от их исходных положений.

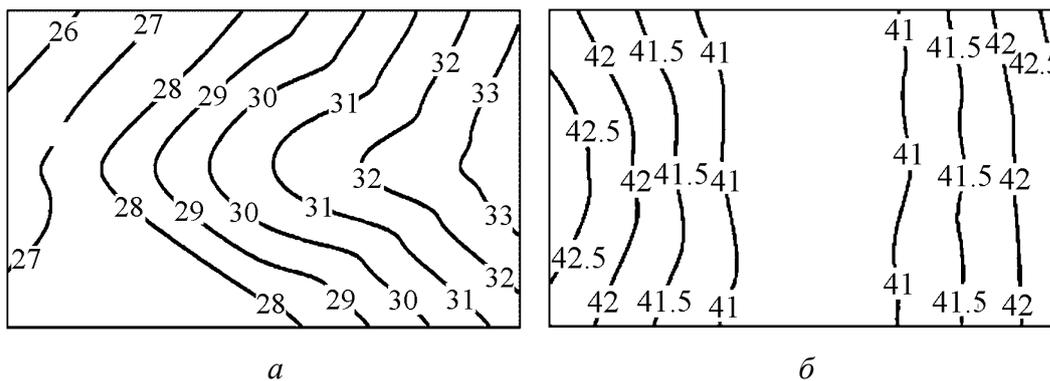


Рис. 4. Распределение твердости в алюминиевом образце: *a* – исходный литой, *б* – после одного прохода ПВЭ

Что касается полимера ПА-6, то, как было упомянуто выше, перетекание для него выражено в меньшей степени. На рис. 3,е отклонение центральной метки от ее исходного положения не многим отличается от соответствующих откло-

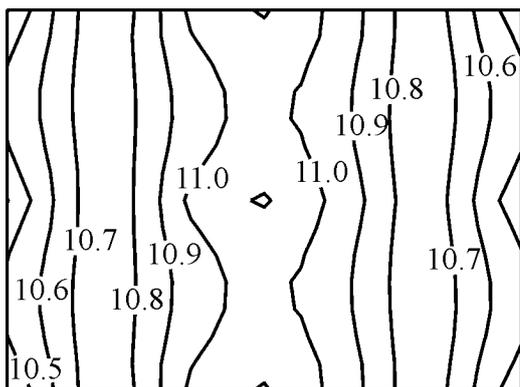


Рис. 5. Распределение твердости по поперечному сечению экструдированного ПА-6

нений остальных меток сечения. Это свидетельствует о преобладании по всему сечению полимерной заготовки одной составляющей пластического течения. Распределение прочностных свойств в сечении ПА-6 после деформирования ПВЭ имеет сходные черты с распределением в металле и характеризуется вытянутыми изолиниями твердости вдоль короткой стороны сечения, однако твердость в данном случае максимальна в центральной зоне и убывает в направлении периферии сечения (рис. 5).

Одним из факторов, влияющих на интенсивность перетекания материала в поперечном сечении при ПВЭ, является форма профиля деформирующей матрицы. По аналогии с процессом ВЭ увеличение числа и высоты препятствий при движении материальных точек по кратчайшим путям вдоль контактной поверхности матрицы снижает «сквозную» составляющую течения материала. В этом случае общее течение смещается в сторону «сдвигового» и согласно (3) интенсивность перетекания уменьшается. Этот фактор дает возможность получать различные структуры в обрабатываемых материалах.

Выводы

1. Установлено, что в процессе ПВЭ имеет место так называемое перетекание, характерное для процесса традиционной ВЭ. Оно представляет собой суперпозицию «сквозной» и «сдвиговой» составляющих течения материала.

2. На примере алюминиевого сплава АД1 и полимера ПА-6 показано, что распределение твердости по поперечному сечению деформированной заготовки для металлического и полимерного материалов имеет сходный характер – вытянутые изолинии вдоль короткой стороны сечения, однако положения максимума и минимума твердости для них противоположны. Такое отличие может быть связано с более интенсивным процессом перетекания в случае металлической заготовки по сравнению с полимерной при реализации ПВЭ.

1. *Р.З. Валиев, И.В. Александров*, Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства, Академкнига, Москва (2007).
2. *V.A. Beloshenko, A.V. Voznyak, Yu.V. Voznyak, V.A. Glasunova, T.E. Konstantinova*, Polym. Eng. Sci. **52**, 1815 (2012).
3. *V.A. Beloshenko, A.V. Voznyak, Yu.V. Voznyak, G.V. Dudarenko*, J. Appl. Polym. Sci. **127**, 1377 (2013).

4. Я.Е. Бейгельзимер, В.Н. Варюхин, Д.В. Орлов, С.Г. Сынков, Винтовая экструзия – процесс накопления деформации, ТЕАН, Донецк (2003).
5. Я.Е. Бейгельзимер, Д.В. Прилепо, С.Г. Сынков, ФТВД **17**, № 2, 100 (2007).
6. Y. Beygelzimer, D. Prilepo, R. Kulagin, V. Grishaev, O. Abramova, V. Varyukhin, M. Kulakov, J. Mater. Proc. Techn. **211**, 522 (2011).
7. Я.Е. Бейгельзимер, Д.В. Прилепо, В.И. Капустин, Обработка материалов давлением **27**, № 2, 14 (2011).
8. Y. Beygelzimer, A. Reshetov, S. Synkov, O. Prokof'eva, R. Kulagin, J. Mater. Proc. Techn. **209**, 3650 (2009).
9. Y. Beygelzimer, V. Varyukhin, S. Synkov, Int. J. Mater. Form. **1**, 443 (2008).

O. Prokof'eva, Yu.V. Voznyak, D. Prilepo

PECULIARITIES OF PLASTIC FLOW OF METALLIC AND POLYMERIC MATERIALS UNDER SEVERE PLASTIC DEFORMATION BY PLANAR TWIST EXTRUSION

By the example of aluminum alloy and polyamide-6, plastic flow of metal and polymer under severe plastic deformation implemented by the planar twist extrusion (PTE) was studied. The mentioned process is of certain advantages; it retains the main features of the conventional twist extrusion. This fact allowed using the affinity of the processes during investigation. The experimental data were obtained with the use of elements of an experimental-calculation method, involving the introduction the marker-fibers to the billet. It was shown, the revealed overflow effect taking place at planar twist extrusion is caused by the presence of the «open-ended» and «shear» components of the plastic flow of material. It was found that the overflow is more strongly expressed in the case of metal compared with the polymer. It is assumed, that this feature of plastic flow can be the reason of observed differences in the hardness distribution over the cross section of investigated extrudates.

Keywords: severe plastic deformation, plastic flow, planar twist extrusion, aluminum alloy, polyamide-6

Fig. 1. Schemes of PTE (*a*), TE (*b*) and succeeding cross-sections of the channels at PTE (*в*) and TE (*г*)

Fig. 2. Scheme of the billet to be tested

Fig. 3. Cross-sections of the aluminum billet (*a*, *в*) and the polyamide billet (*б*, *г*) in the initial state (*a*, *б*) and after one pass of PTE (*в*, *г*); comparison of marker positions before (solid markers) and after PTE (blank markers) (*д*, *е*)

Fig. 4. Hardness distribution in the aluminum sample: *a* – the initial cast one, *б* – after one PTE pass

Fig. 5. Hardness distribution over the cross-section of the extruded PA-6