

DOI: [10.7242/1999-6691/2021.14.4.36](https://doi.org/10.7242/1999-6691/2021.14.4.36)

УДК 539.374

**ИСКАЖЕНИЕ ФОРМЫ, ЛОКАЛИЗАЦИЯ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ
И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ
ПРИ ОДНОСТОРОННЕЙ ПРОКОВКЕ/ОБКАТКЕ БРУСА:
ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ К АДДИТИВНОМУ ПРОИЗВОДСТВУ ШПАНГОУТА
С ПОСЛОЙНОЙ ОБРАБОТКОЙ ДАВЛЕНИЕМ**

И.Э. Келлер^{1,2}, А.В. Казанцев², Д.С. Дудин^{1,2}, Г.Л. Пермяков², М.Ф. Карташев²

¹*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Российская Федерация*

²*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Российская Федерация*

Строится численная модель формирования напряжённо-деформированного состояния в призматическом брусе при его односторонней обработке пластическим деформированием. Подобная модель требуется для выбора рациональных режимов послойной обработки давлением аддитивно наращиваемых линейных металлических сегментов. С помощью проковки или обкатки наплаваемых слоёв металла можно управлять искажениями формы, остаточными напряжениями и характеристиками прочности изделия. Моделируется процесс, состоящий из двух этапов: односторонней поверхностной обработки давлением образца, закреплённого по противоположной грани на плоской поверхности нормальными связями, и освобождения образца от закреплений. По данным эксперимента в численной модели калибруется воздействие пневмомолотка и находится эквивалентная глубина обкатки роликом. Исследуются распределения пластических деформаций и продольных остаточных напряжений по поперечному сечению образца, продольное и поперечное искривление последнего, природа деформаций при разгрузке образца для сплавов АМг6, ВТ6 и нержавеющей стали 12Х18Н10Т в зависимости от глубины обкатки роликом. Для каждого из материалов обнаружено существование критической величины обкатки, после которой изменяется знак продольной кривизны образца. Обнаружено антикластическое искривление образцов-полос. Обсуждаются методы экспериментального определения состояния закреплённого образца (сегмента шпангоута) по его разгруженному состоянию. Отмечена приемлемость данных о распределении микротвёрдости по высоте поперечного сечения образца для оценки зоны локализации пластических деформаций и о продольной кривизне образца для оценки остаточных напряжений. Показана сомнительная ценность результатов измерений в вертикальных сечениях образцов остаточных напряжений из-за их существенной неоднородности, а также перераспределения при вырезке.

Ключевые слова: аддитивное производство, послойная проковка, локализация пластических деформаций, остаточные напряжения, численный расчёт, эксперимент

**SHAPE DISTORTIONS, PLASTIC STRAINS AND RESIDUAL STRESSES
AFTER ONE-SIDED FORGING/ROLLING OF THE BEAM:
APPLICATION TO ADDITIVE MANUFACTURING OF THE LINEAR METAL SEGMENT
WITH LAYER-BY-LAYER PRESSURE TREATMENT**

I.E. Keller^{1,2}, A.V. Kazantsev², D.S. Dudin^{1,2}, G.L. Permyakov² and M.F. Kartashev²

¹*Institute of Continuous Media Mechanics of the UB RAS, Perm, Russian Federation*

²*Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation*

A numerical model of the formation of a stress-strain state in a prismatic beam during its unilateral processing by plastic strains is developed. Such a model is required to select rational modes of layer-by-layer pressure treatment of additively accreted linear metal segments. Shape distortions, residual stresses and strength characteristics can be controlled through forging or rolling of the deposited metal layers. The process consisting of a stage of unilateral surface pressure treatment of a sample fixed on the opposite face on a flat surface by normal bonds, and a stage of releasing the sample from the fastenings is modeled. According to the experimental data, the impact of a pneumatic hammer is calibrated in the numerical model and the equivalent depth of the roller insertion is determined. The inhomogeneity of the distribution of plastic strains and longitudinal residual stresses along the cross section of the sample, the longitudinal and transverse curvature of the latter, the nature of deformations during unloading of the sample for АМg6 and VT6 alloys and 12Х18Н10Т stainless steel, depending on the depth of the roller insertion, is investigated. For each of the materials, the existence of a critical roller insertion depth was found, after which the sign of the longitudinal curvature of the sample changes. Anticlastic curvature of samples of sufficiently large width was found. Methods of experimental determination of the state of a fixed sample (a linear segment of the frame) based on the state of the unloaded sample are discussed. The acceptability of measurements of the microhardness distribution over the height of the cross-section of the sample to estimate the localization zone size of plastic strains, as well as the acceptability of measurements of the longitudinal curvature of the sample to estimate residual stresses, are established. The questionable value of measurements of longitudinal residual stresses is demonstrated due to their significant heterogeneity, as well as redistribution during cutting layers.

Key words: additive manufacturing, layer-by-layer forging, localization of plastic strains, residual stresses, numerical calculation, experiment

1. Задача и цели исследования

Аддитивное производство проволоочно-дуговой наплавкой позволяет создавать металлические изделия сложной формы при значительной экономии материала. В настоящее время эта технология

обеспечивает синтез практически сплошного металла, однако его дендритная структура не обладает прочностными характеристиками катаного металла. Для получения однородной зёрненной структуры материала в ряде университетов (Университеты Крэнфилда и Манчестера [1–6], Индийский институт технологии Бомбея [7–8], Пермский национальный исследовательский политехнический университет [9–12]) в рамках научных коллабораций и проектов разрабатываются гибридные технологии производства крупногабаритных сегментированных изделий с последовательной наплавкой слоёв и проковкой или обкаткой их роликом.

Управляя режимами наплавки и проковки/обкатки в рамках гибридного аддитивного производства, можно добиться формирования однородной мелкозернистой структуры вследствие рекристаллизации или фазовых превращений, происходящих в наклёпанном металле при повышенных температурах. Кроме улучшения всего спектра прочностных характеристик, данные режимы приемлемы для исправления поля остаточных напряжений и вызванных ими искажений геометрии конструкции. Собственные деформации, вызванные кристаллизацией и охлаждением наплавленного слоя, а также пластической обработкой заготовки, порождают остаточные напряжения, которые могут релаксировать вследствие превращений зёрен. Для управления этими сложными процессами требуется построение связанной модели механики деформируемого твёрдого тела и понимания специфики частных задач.

Настоящая работа направлена на изучение искажения формы, локализации пластической деформации и распределения остаточных напряжений, вызванных односторонней проковкой или прокаткой бруса. Данные явления будут исследоваться для сплавов АМг6, ВТ6 и нержавеющей стали 12Х18Н10Т путём численного расчёта модельных задач односторонней проковки и обкатки роликом бруса с использованием пакета программ LS-DYNA® и сравнения рассчитанных данных с экспериментальными результатами, устанавливаемыми с помощью измерений изгиба и распределений микротвёрдости и остаточных напряжений в сечениях заготовки, подвергнутой односторонней проковке пневмомолотком.

Полученные результаты необходимы для выбора рациональных режимов обработки наплавленного слоя давлением, создающей необходимый наклёп металла, трансформирующей дендриты в мелкозернистую кристаллическую структуру при критических температурах, сопровождающих наплавление следующих слоёв. В каждом из рассматриваемых металлических сплавов реализуются различные механизмы трансформации зёрненной структуры (рекристаллизация в алюминиевом сплаве, мартенситные превращения в аустенитной нержавеющей стали и титановом сплаве), но происходящие по общему сценарию (наклёп с последующим воздействием температуры). Поэтому выделенная задача и соответствующая математическая модель важны для настройки технологии аддитивного производства изделий из широкого спектра конструкционных металлических сплавов. Деформационное упрочнение и перекристаллизация в твёрдом теле слабо влияют на теплофизические процессы в наплавленном материале, возможна формулировка несвязанной модели, в которой задача кристаллизации и тепломассопереноса решаются по-отдельности. В результате определяются распределения температуры в заготовке и собственных деформаций усадки в присоединённом слое; в качестве основной при таком подходе выступает задача трансформации зёрненной структуры материала в известных полях остаточных напряжений, источником которых являются несовместные деформации усадки и пластические деформации. Задача, рассматриваемая ниже, необходима для оценки вклада операции обработки давлением в напряжённо-деформированное состояние заготовки.

2. Постановка модельной задачи и процедура ее численного решения

Имеем прямой призматический брус прямоугольного сечения, который считаем идеализированным линейным элементом (шпангоутом) наращиваемой сегментированной конструкции. Нижняя грань бруса жестко закреплена по нормали к ней, а запрет на малые деформации в плоскости этой грани отсутствует. Данные ограничения наиболее точно отражают эксперимент, организованный для подтверждения результатов решения модельной задачи, которая будет обсуждаться в следующем разделе. Верхняя грань бруса подвергается проковке либо обкатке роликом — «точечным» технологиям обработки давлением, обеспечивающим локализацию пластической деформации вблизи обрабатываемой поверхности (Рис. 1).

Известно [13–18], что продольный пластический изгиб бруса чувствителен к отношению h/b , где h — высота, b — ширина прямоугольного поперечного сечения, вариация которого от 0 до ∞ соответствует изменению схемы от плоского деформированного до плоского напряжённого состояния в поперечном направлении. В зависимости от этого параметра изменяются распределение по поперечному сечению продольной компоненты остаточных напряжений, продольная и поперечная кривизны бруса и пограничные эффекты. Для применения результатов к наращиваемым линейным элементам с различным форм-фактором поперечного сечения модельная задача решается для тел с несколькими значениями h/b . Отметим, что при $h/b \rightarrow 0$, когда брус превращается в пластину, рассматриваемая здесь схема нагружения принципиально отличается от схемы нагружения при дробеструйной обработке пластины [19], о чём будет сказано при анализе результатов.

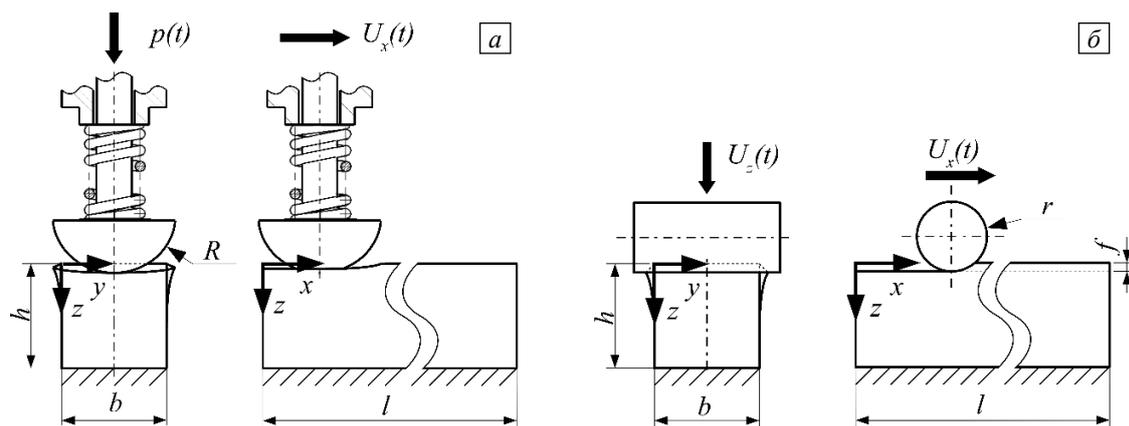


Рис. 1. Расчётные схемы проковки (а) и обкатки валиком (б) образца

Процесс нагружения организован так, что осуществляется в два этапа: 1) односторонняя проковка либо обкатка роликом закреплённой заготовки; 2) освобождение заготовки от закрепления. Операции проковки шпангоута сегментированной конструкции соответствует 1-й этап; 2-й этап даёт возможность сравнения стрелы прогиба бруса и распределений по его сечениям остаточных напряжений и деформационного наклёпа с экспериментом. Оба этапа рассчитываются в упругопластической постановке.

Для описания больших пластических и малых упругих деформаций металлов используется стандартная модель [20, 21] в терминах текущего лагранжева подхода в скоростях, численно реализованная в пакете LS-DYNA[®]. Принята аддитивность упругих и пластических тензоров деформаций скорости, при этом упругий тензор связывается линейно с производной Яуманна тензора напряжений Кирхгоффа, а пластический тензор — с законом пластического течения

$$d_{ij}^p = \frac{1}{H} \dot{s}_{ij} \frac{s_{ij}}{\sigma_u}, \quad (1)$$

где d_{ij}^p — компоненты дивергента скоростей пластических деформаций, $s_{ij} = \sigma_{ij} - \sigma_{kk} \delta_{ij}$ — компоненты дивергента напряжений, \dot{s}_{ij} — материальная производная этого тензора, σ_u — предел текучести при одноосном растяжении, H — параметр деформационного упрочнения $H = \partial \sigma_u / \partial \varepsilon_p$. В (1) подразумевается пластический потенциал, ассоциированный с критерием текучести Мизеса

$$\sigma_M = \sigma_u. \quad (2)$$

При этом $\sigma_M = \sqrt{3s_{ij}s_{ij}/2}$ — интенсивность напряжений, а для предела текучести σ_u при одноосном растяжении принят закон изотропного упрочнения Джонсона–Кука в форме:

$$\sigma_u = \left(A + B\varepsilon_p^n \right) \left(1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_*} \right), \quad (3)$$

где $\dot{\varepsilon}_p = \sqrt{2d_{ij}^p d_{ij}^p / 3}$ — интенсивность скоростей деформаций, $\varepsilon_p = \int_0^t \dot{\varepsilon}_p dt$ — накопленные пластические деформации. Параметр H в (1) находится из закона (3). В пакете LS-DYNA[®] данной модели соответствует стандартный материал MAT_098 [21]. Зависимость от скорости деформаций учитывалась для материала АМг6, для которого в численной модели проковки калибровалось воздействие пневмомолотком и определялась эквивалентная глубина вдавливания инструмента при расчёте в случае обкатки роликом.

Константы A , B , C , $\dot{\varepsilon}_*$, n закона упрочнения Джонсона–Кука взяты (либо получены аппроксимацией данных) из [22] для АМг6, из [23] для 12Х18Н10Т и из [24] для ВТ6. Числовые данные сведены в таблицу 1.

Численное решение контактной динамической задачи пластического деформирования исследуемого бруса в квазистатической постановке выполнено в пакете LS-DYNA[®], в котором реализован метод конечных элементов с учётом геометрической и упругопластической нелинейностей. При решении задач

Таблица 1. Константы закона упрочнения Джонсона–Кука

Материал	A , МПа	B , МПа	C	$\dot{\epsilon}_*$, с ⁻¹	n
АМг6	184	4210	0,0474	1	1,2
12Х18Н10Т	305	1161	0	1	0,61
ВТ6	968	380	0	1	0,42

обработки давлением интегрирование уравнений движения ансамбля конечных элементов с числом степеней свободы более 100 тысяч выполнялось с использованием явной схемы. Этап освобождения бруса от закреплений рассматривался в упругопластической постановке на основе неявной схемы. В неявной схеме интегрирования применялись 8-узловые элементы с интегрированием поля деформаций в восьми точках Гаусса, в явной схеме — 8-узловые элементы с единственной точкой интегрирования. Алгоритм решения контактной задачи предполагал задание наборов, состоящих из узлов и граней элементов контактирующих поверхностей. Корректная работа контактирующей группы достигалась путём подбора коэффициента контактной жёсткости. Коэффициент сухого трения принимался равным нулю. Начальная плотность и упругие константы помещены в таблицу 2.

Таблица 2. Физические константы материалов

Материал	ρ_0 , кг/м ³	E , ГПа	ν
АМг6	2640	71	0,3
ВТ6	4450	115	0,32
12Х18Н10Т	7800	206	0,3

Явная схема, в которой шаг по времени, в соответствии с критерием Куранта, прямо пропорционален квадратному корню из плотности материала, потребовала традиционного для задач, решаемых в рамках квазистатики, снижения времени счёта. Для этого плотность материала заготовки искусственно увеличивалась, а появляющиеся динамические эффекты устранялись подбором приемлемых коэффициентов диссипации кинетической энергии системы. Предпринятые меры соответствуют рекомендациям разработчиков программного обеспечения [25, 26].



Рис. 2. Внешний вид прокованного образца (а) и искажённые поперечные срезы образцов из материалов АМг6, 12Х18Н10Т и ВТ6 (б)

Параметры ударного воздействия при проковке пневмомолотком имели следующие значения: энергия удара 19,74 Дж; частота 2820 уд/мин; рабочее давление 0,63 МПа; давление прижима бойка 0,2 МПа; скорость движения бойка вдоль заготовки 300 мм/мин. Боек имел сферический наконечник радиусом

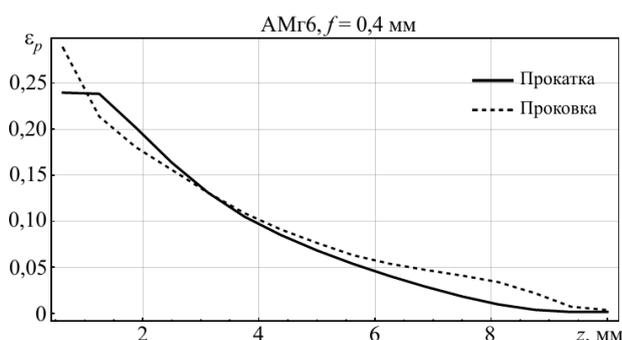


Рис. 3. Распределение накопленных пластических деформаций по высоте поперечного сечения образца вдоль плоскости симметрии

$R = 15$ мм. Мощность воздействия в численной модели калибровалась с помощью следующего эксперимента. Брус размерами 250×24×10 мм из проката АМг6, отожжённый при температуре 550°С в течение 3 часов и охлаждённый на воздухе, прижимался на концах к жёсткой поверхности и проковывался с узкой стороны. Искажения его поперечного сечения в четырёх поперечных срезах измерялись с помощью цифрового оптического микроскопа Nirox КН-7700. Они оказались локализованными на глубине 7–9 мм от поверхности прокатки

(см. Рис. 2). Калибровка усилия в численном расчёте производилась по продольным и поперечным деформациям сечения в области локализации деформации (Рис. 3). Поскольку вычисления для операции проковки бруса занимали вчетверо большее время, чем для операции обкатки, а также вследствие того, что при обкатке достигается большая однородность распределения напряжений и деформаций по поперечной координате, большинство численных результатов в рамках настоящего исследования получено для задачи обкатки роликом (при радиусе ролика $r = 7,5$ мм). В этой задаче величины пластических деформаций и глубина их локализации, сравнимые с наблюдаемыми при проковке, соответствовали глубине внедрения ролика $f = 0,4$ мм (Рис. 3).

3. Особенности распределения напряжений и деформаций

Брус длиной $l = 200$ мм, закреплённый на жёсткой горизонтальной поверхности нормальными связями по одной грани, обкатывался роликом по параллельной грани и освобождался от закреплений. Для всех рассматриваемых материалов исследовались продольная кривизна, распределения пластических деформаций и остаточных напряжений по поперечному сечению в зависимости от глубины обкатки роликом и формы поперечного сечения.

На рисунке 4 приведены распределения продольной компоненты остаточных напряжений и накопленных пластических деформаций по поперечному сечению образца из АМг6, отвечающему середине длины образца l . Видно, что распределения неоднородны по поперечной координате. Кроме того, равновесие, требующее равенства нулю суммарного значения σ_x по сечению, не выполняется вдоль любого отрезка по координате z , что создаёт трудности контроля данных при экспериментальном определении остаточных напряжений. Тем не менее, далее распределения полей будут исследоваться вдоль отрезка, лежащего на оси симметрии поперечного сечения.

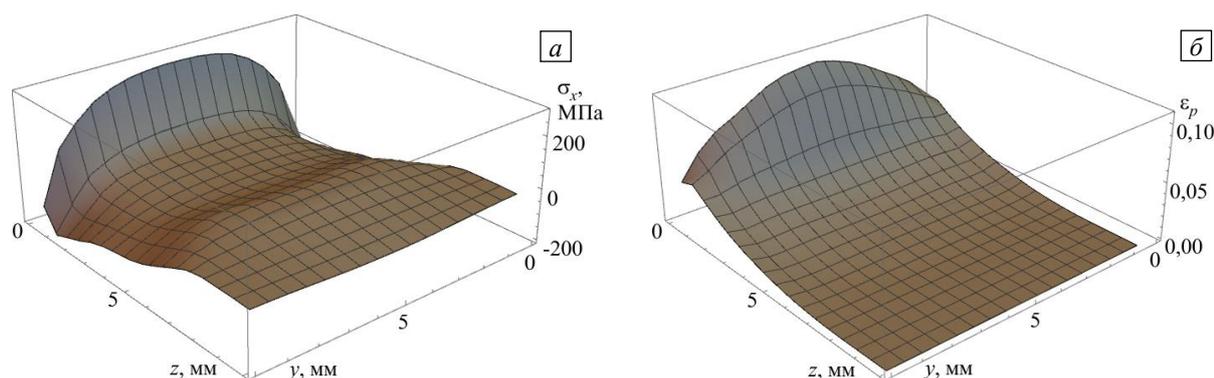


Рис. 4. Распределения продольных остаточных напряжений (а) и накопленных пластических деформаций (б) по поперечному сечению в середине образца из АМг6 при $f = 0,1$ мм

На рисунке 5 представлены распределения продольной компоненты остаточных напряжений и поперечной компоненты пластических деформаций вдоль указанного выше отрезка в зависимости от глубины обкатки. Видно, что для всех исследуемых материалов продольная компонента напряжения не равновесна вдоль этого отрезка в интегральном смысле. Оказалось, что распределения поперечной компоненты пластических деформаций практически конгруэнтны распределениям накопленных пластических деформаций и даются здесь для последующего сравнения с величинами продольной

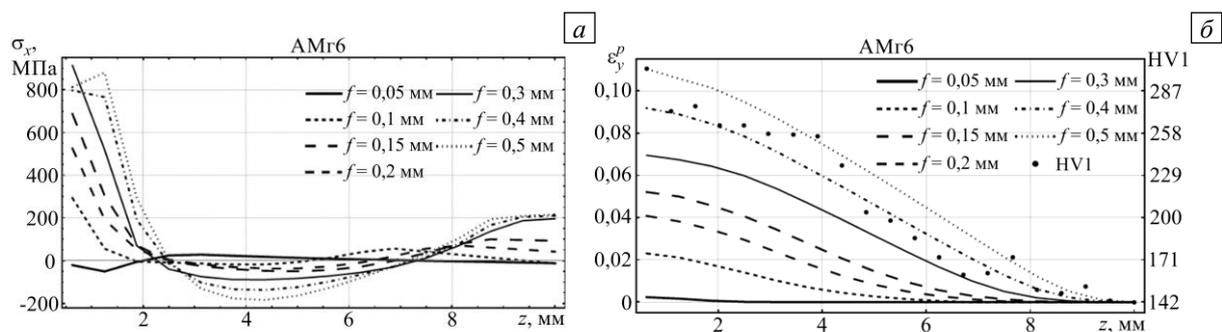


Рис. 5. Распределения продольных остаточных напряжений (а), поперечных пластических деформаций и микротвёрдости (б) по высоте образцов, изготовленных из разных материалов при различной глубине внедрения ролика

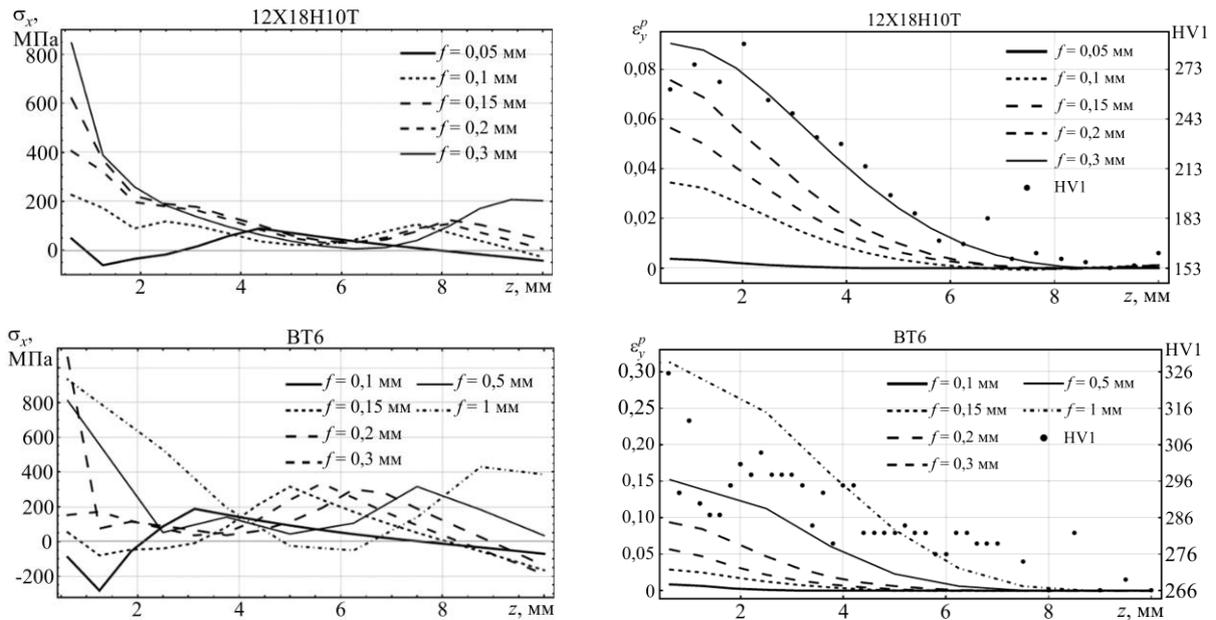


Рис. 5. Продолжение

компоненты. Графики демонстрируют рост пластической зоны при увеличении глубины обкатки (здесь HV1 — микротвёрдость). Необходимо принять во внимание, что эквивалентные действию пневмомолотка глубины обкатки составляют 0,4 мм для АМг6, 0,2 мм для 12Х18Н10Т и 0,1 мм для ВТ6. Завышенные максимальные напряжения в расчётах объясняются несовершенством аппроксимации кривых упрочнения на основе закона Джонсона–Кука.

На рисунке 6 для сравнения приведены кривые полных и пластических продольных деформаций до (ϵ_x^0 и ϵ_x^{p0}) и после (ϵ_x и ϵ_x^p) освобождения образца от закрепления. Диаграммы обоих параметров свидетельствуют об упругом характере деформирования образца после его освобождения, что зафиксировано у образцов из АМг6 и 12Х18Н10Т для всех степеней обкатки и у образца из ВТ6 — для $f = 0,1 \div 0,2$ мм. Разгрузка образцов из ВТ6, прокатанных более чем на 0,3 мм, сопровождается пластическим изгибом. Из рисунка 6 также видно, что градиенты полных продольных деформаций, соответствующие глубинам обкатки 0,05 и 0,4 мм, имеют разные знаки, что говорит и о разных знаках кривизн разгруженных образцов.

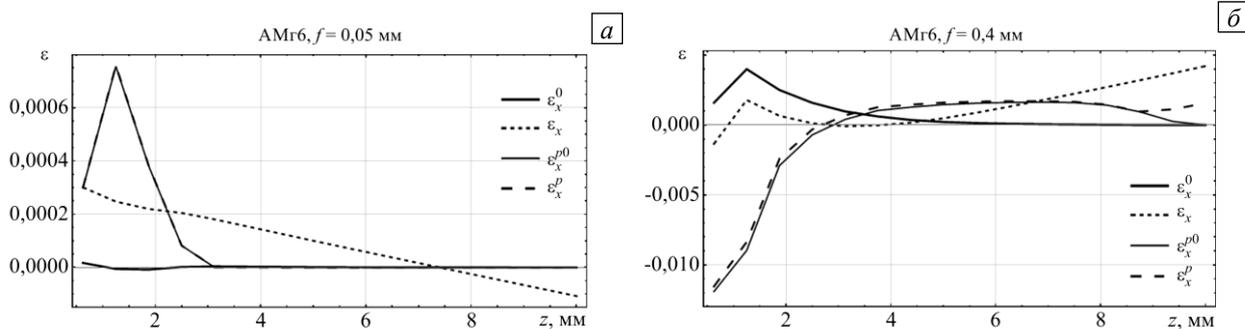


Рис. 6. Распределения продольных полных и пластических деформаций по поперечному сечению образца из АМг6 в случае закрепления (а) и после освобождения от закрепления (б)

Для исследования продольного изгиба разгруженных образцов в зависимости от глубины обкатки определялись их кривизны по трём точкам закреплённой при обкатке поверхности (при 25, 50 и 75% длины образца l). Рисунок 7а свидетельствует о наличии у кривых последовательных фаз роста, убывания и смены знака при увеличении степени поверхностных деформаций. При малых глубинах обкатки образец имеет выпуклость, обращенную к инструменту, при больших — направленную от него. Данный факт ранее отмечался в работе [18] для пластин, подвергнутых односторонней дробеструйной обработке. В отличие от схем нагружения, рассматриваемых в работах [13–17], здесь изгиб вызывается однородно распределённым по длине бруса продольным моментом, возникающим из-за несовместного поля пластических деформаций. Главным образом за это отвечают поперечные компоненты пластических деформаций, превышающие продольные минимум на порядок (см. Рис. 5 и 6).

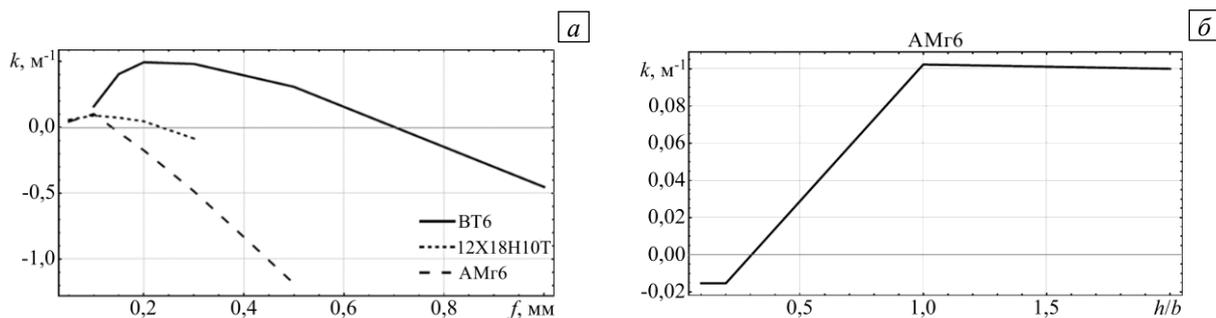


Рис. 7. Зависимости кривизны брусьев квадратного сечения из различных материалов от глубины внедрения ролика (а); зависимость кривизны бруса прямоугольного сечения от его форм-фактора (б)

Более полная картина искажения образца получается из анализа зависимости кривизны от отношения высоты к ширине поперечного сечения (Рис. 7б). Так, у образца АМг6, прокатанного на глубину 0,1 мм, кривая резко меняет знак при изменении форм-фактора поперечного сечения h/b . По рисунку 8 видно, что это превращение сопровождается антикластическим искривлением — поперечным искривлением образца, имеющим противоположный знак по отношению к продольному искривлению. Данные рисунка 9 свидетельствуют о том, что распределения остаточных напряжений и пластических деформаций чувствительны к форме поперечного сечения образца. В целом полученные результаты указывают на сложность проблемы контроля напряжённо-деформированного состояния подвергаемых поверхностной пластической деформации образцов, даже при их канонической форме.

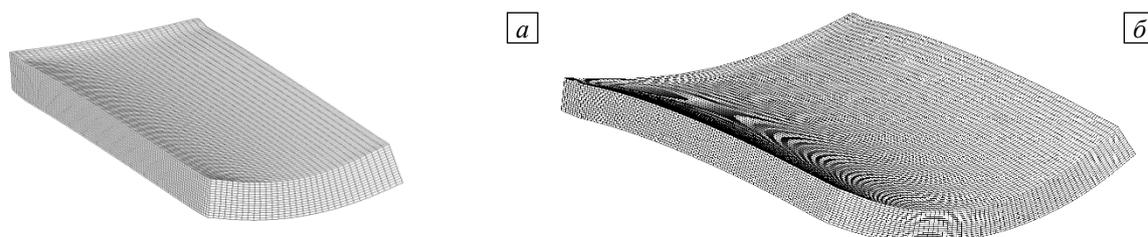


Рис. 8. Антикластическое искривление пластин АМг6, обкатанных роликом на 0,1 мм (поверхность обкатки снизу, перемещения увеличены в 40 раз) при различной ширине, мм: 50 (а) и 100 (б)

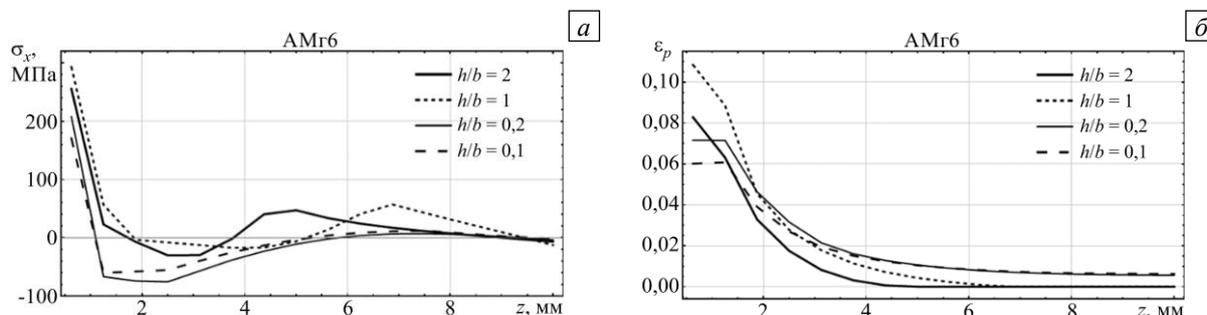


Рис. 9. Распределения продольных остаточных напряжений (а) и накопленных пластических деформаций (б) по высоте образцов с различным форм-фактором поперечного сечения

4. Экспериментальное подтверждение результатов расчёта

Выполнены эксперименты по проковке пневмомолотком образцов, вырезанных из проката АМг6, 12Х18Н10Т и ВТ6. Образцы подвергались предварительной термообработке: алюминиевый сплав — отжигу в течение 3 часов при 550°С с охлаждением на воздухе; нержавеющая сталь — отжигу в течение 2 часов при 1050°С в атмосфере аргона и охлаждению вместе с печью; титановый сплав — закалке в течение 1 часа при 900°С с охлаждением на воздухе, старению в течение 3 часов при 500°С и охлаждению с печью. Эксперименты проводились на установке гибридного аддитивного производства, сконструированной на базе металлообрабатывающего центра. Образцы в форме прямоугольных параллелепипедов (брусьев) длиной 240 мм, шириной 10,3 и высотой 23,7 мм фиксировались на жесткой плите основания пятью винтами. Путём варьирования величин давления прижима бойка пневмомолотка к образцу 0,2 и 0,4 МПа и скорости движения бойка вдоль образца 150 и 300 мм/мин найдены их оптимальные значения 0,2 МПа и 300 мм/мин, обеспечивающие лучшую однородность распределения

пластической деформации вдоль образца. На рисунке 2а приведено фото прокованного образца алюминиевого сплава.

Из прокованных образцов на электроэрозионном станке вырезались поперечные и продольные слои толщиной 2 мм (Рис. 2б), плоскопараллельные грани которых обрабатывались на шлифовальных листах Р240–Р2000, закреплённых на притирочной плите. Слои служили для определения профилей микротвёрдости по Виккерсу и тангенциальных компонент остаточных напряжений в их плоскости. Продольные слои вырезались из середины образца для обеспечения однородности распределения пластических деформаций по толщине.

Профили микротвёрдости HV1 вдоль оси симметрии слоя, вырезанного поперёк образца, находились при помощи микротвердомера Shimadzu HNV-G21 с силой вдавливания 9,8 Н (1 кгс) в соответствии со стандартом [27]. Расстояние между точками варьировалось от 20 до 500 мкм со сгущением к поверхности проковки. Величины микротвёрдости, приведённые на рисунке 5, демонстрируют вблизи поверхности проковки наличие погранслоя, параметры которого согласуются с параметрами погранслоя пластических деформаций.

Для того чтобы использовать изгиб образца, освобождённого от закрепления, в качестве дополнительного параметра для сопоставления данных расчёта и эксперимента, был изготовлен образец 240×10×10 мм из сплава АМг6. Поверхности проковки и закрепления доводились до плоского состояния на притирочной плите. Образец закреплялся прижимами на концах и проковывался с такими же параметрами, как у рассмотренных выше образцов. Значение стрелы прогиба на базе 200 мм составило 1 мм, что отличается от расчётного значения 1,21 мм при $f = 0,4$ мм на 21%.

Профиль остаточных напряжений по толщине образца определялся с помощью рентгеновского автоматического дифрактометра XSTRESS-3000. Для этого в продольном слое вдоль координаты, соответствующей толщине образца, с шагом 1 мм находилось значение тангенциальной компоненты поверхностных напряжений, соответствующей продольной координате образца. Таким образом, для прокованного бруса высотой 23–24 мм устанавливалось 23–24 значения. Ни качественного, ни количественного совпадения в этих данных с результатами расчёта обнаружить не удалось. Вероятно, это связано с недооценённой ролью поперечных компонент остаточных напряжений, которые порождаются несомненной частью неоднородного распределения по поперечному сечению образца значительных по величине поперечных пластических деформаций. Эти компоненты исчезают при вырезке из образца продольного слоя.

5. Заключение

Выполненное исследование искажения формы разгруженного образца, предварительно обработанного обкаткой либо проковкой, а также распределений пластических деформаций и остаточных напряжений по его поперечному сечению позволяет выделить надёжно измеряемые характеристики, по которым можно судить о состоянии после проковки линейного элемента, выращенного аддитивным производством. Одна из таких характеристик — изгиб разгруженного образца, который при реальных параметрах проковки в рамках данной технологии почти всегда оказывается упругим, может служить мерой продольных остаточных напряжений в его неразгруженном состоянии. Непосредственное измерение остаточных напряжений, вследствие неоднородности их распределения по поперечному сечению образца, встречается с методическими трудностями. Другой характеристикой является профиль микротвёрдости по высоте вертикального среза образца. Профиль коррелирует с распределением накопленной пластической деформации (наклёпа) и позволяет судить о глубине локализации пластической деформации после обработки образца давлением. Выявлена немонотонная зависимость от глубины обкатки продольной кривизны бруса (а следовательно, и продольных остаточных напряжений), которую необходимо принимать во внимание при выборе рациональных параметров технологического процесса.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 21-19-00715).

Литература

1. Colegrove P.A., Coules H.E., Fairman J., Martina F., Kashoob T., Mamash H., Cozzolino L.D. Microstructure and residual stress improvement in wire and arc additively manufactured parts through high-pressure rolling // J. Mater. Process. Tech. 2013. Vol. 213. P. 1782-1791. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.04.012>
2. Martina F., Colegrove P.A., Williams S.W., Meyer J. Microstructure of interpass rolled wire + arc additive manufacturing Ti-6Al-4V components // Metall. Mater. Trans. A. 2015. Vol. 46. P. 6103-6118. <https://doi.org/10.1007/s11661-015-3172-1>
3. Gu J., Ding J., Williams S.W., Gu H., Bai J., Zhai Y., Ma P. The strengthening effect of inter-layer cold working and post-deposition heat treatment on the additively manufactured Al-6.3Cu alloy // Mater. Sci. Eng. 2016. Vol. 651. P. 18-26. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.10.101>

4. Gu J., Wang X., Bai J., Ding J., Williams S.W., Zhai Y., Liu K. deformation microstructures and strengthening mechanisms for the wire+arc additively manufactured Al-Mg4.5Mn alloy with inter-layer rolling // *Mater. Sci. Eng.* 2018. Vol. 712. P. 292-301. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.11.113>
5. Hönnige J.R., Colegrove P.A., Ganguly S., Eimer E., Kabra S., Williams S.W. Control of residual stress and distortion in aluminium wire + arc additive manufacture with rolling // *Addit. Manuf.* 2018. Vol. 22. P. 775-783. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.06.015>
6. McAndrew A.R., Rosales M.A., Colegrove P.A., Hönnige J.R., Ho A., Fayolle R., Eytayo K., Stan I., Sukrongpang P., Crochemore A., Pinter Z. Interpass rolling of Ti-6Al-4V wire + arc additively manufactured features for microstructural refinement // *Addit. Manuf.* 2018. Vol. 21. P. 340-349. <https://doi.org/10.1016/J.ADDMA.2018.03.006>
7. Karunakaran K.P., Kapil S., Negi S. Multi-station multi-axis hybrid layered manufacturing system. Indian Patent. 2018. Application Number 201821038516.
8. Karunakaran K.P., Kapil S., Kulkarni P. In-situ stress relieving process for additive manufacturing. Indian Patent. 2016. Application Number 201621028306.
9. Щицын Ю.Д., Кривоносова Е.А., Трушников Д.Н., Ольшанская Т.В., Карташов М.Ф., Неулыбин С.Д. Использование СМТ-наплавки для аддитивного формирования заготовок из титановых сплавов // *Металлург.* 2020. № 1. С. 63-68. (English version <https://doi.org/10.1007/s11015-020-00967-0>)
10. Щицын Ю.Д., Кривоносова Е.А., Ольшанская Т.В., Неулыбин С.Д. Влияние аддитивной плазменной наплавки на структуру и свойства сплава системы алюминий – магний – скандий // *Цветные металлы.* 2020. № 2. С. 89-94. <https://doi.org/10.17580/tsm.2020.02.12>
11. Shchitsyn Yu., Kartashev M., Krivonosova E., Olshanskaya T., Trushnikov D. Formation of structure and properties of two-phase Ti-6Al-4V alloy during cold metal transfer additive deposition with interpass forging // *Materials.* 2021. Vol. 14. 4415. <https://doi.org/10.3390/ma14164415>
12. Трушников Д.Н., Карташов М.Ф., Ольшанская Т.В., Миндибаев М.Р., Щицын Ю.Д., Раймундо Сауседо Зендехо Ф. Повышение качества изделий из сплава ВТ6, получаемых при многослойной наплавке // *СТИН.* 2021. № 6. С. 12-14. (English version <https://doi.org/10.3103/S1068798X21090264>)
13. Horrocks D., Johnson W. On anticlastic curvature with special reference to plastic bending: A literature survey and some experimental investigations // *Int. J. Mech. Sci.* 1967. Vol. 9. P. 835-861. [https://doi.org/10.1016/0020-7403\(67\)90011-2](https://doi.org/10.1016/0020-7403(67)90011-2)
14. Tan Z., Li W.B., Persson B. On analysis and measurement of residual stresses in the bending of sheet metals // *Int. J. Mech. Sci.* 1994. Vol. 36. P. 483-491. [https://doi.org/10.1016/0020-7403\(94\)90050-7](https://doi.org/10.1016/0020-7403(94)90050-7)
15. Khiabani A.C., Sadrejad S.A. Finite element evaluation of residual stresses in thick plates // *Int. J. Mech. Mater. Des.* 2009. Vol. 5. P. 253-261. <https://doi.org/10.1007/s10999-009-9099-1>
16. Spoorenberg R.C., Snijder H.H., Hoenderkamp J.C.D. Finite element simulations of residual stresses in roller bent wide flange sections // *Journal of Constructional Steel Research.* 2011. Vol. 67. P. 39-50. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2010.07.004>
17. Essa A., Nasr M.N.A., Ahmed M.H. Variation of the residual stresses and springback in sheet bending from plane-strain to plane-stress condition using finite element modeling // *Proc. of the 17th Int. AMME Conference.* Cairo, Egypt, April 19-21, 2016. P. 37-50.
18. Kopp R., Schulz J. Flexible sheet forming technology by double-sided simultaneous shot peen forming // *CIRP Annals.* 2002. Vol. 51. P. 195-198. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)61498-X](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)61498-X)
19. Petukhov D.S., Keller I.E. Exact reconstruction formulas for plastic strain distribution in the surface-treated plate and their applications // *Acta Mech.* 2020. Vol. 231. P. 1849-1866. <https://doi.org/10.1007/s00707-020-02625-7>
20. Khan A.S., Huang S. Continuum theory of plasticity. John Wiley & Sons, 1995. 421 p.
21. LS-DYNA® Keyword user's manual. Volume II. Material models. Version R11.0. LSTC, 2019. 1613 p. <https://www.lstc.com/download/manuals>
22. Глушаков Б.Л., Иенатова О.Н., Пушков В.А., Новиков С.А., Гурин А.С., Сеницын В.А. Динамическое деформирование алюминиевого сплава АМг6 при нормальной и повышенной температурах // *ПМТФ.* 2000. Т. 41, № 6. С. 139-143. (English version <https://doi.org/10.1023/A:1026662824249>)
23. Chandrasekaran H., M'Saoubi R., Chazal H. Modelling of material flow stress in chip formation process from orthogonal milling and split Hopkinson bar tests // *Machining Science and Technology.* 2005. Vol. 9. P. 131-145. <https://doi.org/10.1081/MST-200051380>
24. Li L., He N. A FEA study on mechanisms of saw-tooth chip deformation in high speed cutting of Ti-6Al-4V alloy // *Proc. of the Fifth Int. Conf. on High Speed Machining.* Metz, France, March 14-16, 2006. P. 759-767.
25. Maker B.N., Zhu X. Input parameters for springback simulation using LS-DYNA // *6th Int. LS-DYNA Conf.* Detroit, USA, April, 2000. 12 p. <https://www.dynalook.com/conferences/international-conf-2000/session12-1.pdf/view> (дата обращения: 10.12.2021)
26. Maker B.N., Zhu X. Input parameters for metal forming simulation using LS-DYNA // *3rd European LS-DYNA Conf.* Paris, France, June, 2001. 10 p. <https://www.dynalook.com/conferences/european-conf-2001/58.pdf/view> (дата обращения: 30.10.2021)
27. ASTM E384-17 Standard test method for microindentation hardness of materials. ASTM International, 2017. 40 p.

References

1. Colegrove P.A., Coules H.E., Fairman J., Martina F., Kashoob T., Mamash H., Cozzolino L.D. Microstructure and residual stress improvement in wire and arc additively manufactured parts through high-pressure rolling. *J. Mater. Process. Tech.*, 2013, vol. 213, pp. 1782-1791. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.04.012>
2. Martina F., Colegrove P.A., Williams S.W., Meyer J. Microstructure of interpass rolled wire + arc additive manufacturing Ti-6Al-4V components. *Metall. Mater. Trans. A*, 2015, vol. 46, pp. 6103-6118. <https://doi.org/10.1007/s11661-015-3172-1>

3. Gu J., Ding J., Williams S.W., Gu H., Bai J., Zhai Y., Ma P. The strengthening effect of inter-layer cold working and post-deposition heat treatment on the additively manufactured Al-6.3Cu alloy. *Mater. Sci. Eng.*, 2016, vol. 651, pp. 18-26. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.10.101>
4. Gu J., Wang X., Bai J., Ding J., Williams S.W., Zhai Y., Liu K. deformation microstructures and strengthening mechanisms for the wire+arc additively manufactured Al-Mg4.5Mn alloy with inter-layer rolling. *Mater. Sci. Eng.*, 2018, vol. 712, pp. 292-301. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.11.113>
5. Honnige J.R., Colegrove P.A., Ganguly S., Eimer E., Kabra S., Williams S.W. Control of residual stress and distortion in aluminium wire + arc additive manufacture with rolling. *Addit. Manuf.*, 2018, vol. 22, pp. 775-783. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.06.015>
6. McAndrew A.R., Rosales M.A., Colegrove P.A., Hönnige J.R., Ho A., Fayolle R., Eyitayo K., Stan I., Sukrongpang P., Crochemore A., Pinter Z. Interpass rolling of Ti-6Al-4V wire + arc additively manufactured features for microstructural refinement. *Addit. Manuf.*, 2018, vol. 21, pp. 340-349. <https://doi.org/10.1016/J.ADDMA.2018.03.006>
7. Karunakaran K.P., Kapil S., Negi S. Multi-station multi-axis hybrid layered manufacturing system. Indian Patent. 2018. Application Number 201821038516.
8. Karunakaran K.P., Kapil S., Kulkarni P. In-situ stress relieving process for additive manufacturing. Indian Patent. 2016. Application Number 201621028306.
9. Shchitsyn Yu.D., Krivonosova E.A., Trushnikov D.N., Ol'shanskaya T.V., Kartashov M.F., Neulybin S.D. Use of CMT-surfacing for additive formation of titanium alloy workpieces. *Metallurgist*, 2020, vol. 64, pp. 67-74. <https://doi.org/10.1007/s11015-020-00967-0>
10. Shchitsyn Yu.D., Krivonosova E.A., Olshanskaya T.V., Neulybin S.D. Structure and properties of aluminium – magnesium – scandium alloy resultant from the application of plasma welding with by-layer deformation hardening. *Tsvetnye Metally*, 2020, no. 2, pp. 89-94. <https://doi.org/10.17580/tsm.2020.02.12>
11. Shchitsyn Yu., Kartashev M., Krivonosova E., Olshanskaya T., Trushnikov D. Formation of structure and properties of two-phase Ti-6Al-4V alloy during cold metal transfer additive deposition with interpass forging. *Materials*, 2021, vol. 14, 4415. <https://doi.org/10.3390/ma14164415>
12. Trushnikov D.N., Kartashev M.F., Olshanskaya T.V., Mindibaev M.R., Shchitsyn Yu.D., Saucedo-Zendejo F.R. Improving VT6 titanium-alloy components produced by multilayer surfacing. *Russ. Engin. Res.*, 2021, vol. 41, pp. 848-850. <https://doi.org/10.3103/S1068798X21090264>
13. Horrocks D., Johnson W. On anticlastic curvature with special reference to plastic bending: A literature survey and some experimental investigations. *Int. J. Mech. Sci.*, 1967, vol. 9, pp. 835-861. [https://doi.org/10.1016/0020-7403\(67\)90011-2](https://doi.org/10.1016/0020-7403(67)90011-2)
14. Tan Z., Li W.B., Persson B. On analysis and measurement of residual stresses in the bending of sheet metals. *Int. J. Mech. Sci.*, 1994, vol. 36, pp. 483-491. [https://doi.org/10.1016/0020-7403\(94\)90050-7](https://doi.org/10.1016/0020-7403(94)90050-7)
15. Khibani A.C., Sadmejad S.A. Finite element evaluation of residual stresses in thick plates. *Int. J. Mech. Mater. Des.*, 2009, vol. 5, pp. 253-261. <https://doi.org/10.1007/s10999-009-9099-1>
16. Spoorenberg R.C., Snijder H.H., Hoenderkamp J.C.D. Finite element simulations of residual stresses in roller bent wide flange sections. *Journal of Constructional Steel Research*, 2011, vol. 67, pp. 39-50. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2010.07.004>
17. Essa A., Nasr M.N.A., Ahmed M.H. *Proc. of the 17th Int. AMME Conference. Cairo, Egypt, April 19-21, 2016. P. 37-50.*
18. Kopp R., Schulz J. Flexible sheet forming technology by double-sided simultaneous shot peen forming. *CIRP Annals*, 2002, vol. 51, pp. 195-198. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)61498-X](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)61498-X)
19. Petukhov D.S., Keller I.E. Exact reconstruction formulas for plastic strain distribution in the surface-treated plate and their applications. *Acta Mech.*, 2020, vol. 231, pp. 1849-1866. <https://doi.org/10.1007/s00707-020-02625-7>
20. Khan A.S., Huang S. *Continuum theory of plasticity*. John Wiley & Sons, 1995. 421 p.
21. LS-DYNA® Keyword user's manual. Volume II. Material models. Version R11.0. LSTC, 2019. 1613 p. <https://www.lstc.com/download/manuals>
22. Glushak B.L., Ignatova O.N., Pushkov V.A., Novikov S.A., Girin A.S., Sinitsyn V.A. Dynamic deformation of aluminum alloy AMg-6 at normal and higher temperatures. *J. Appl. Mech. Tech. Phy.*, 2000, vol. 41, pp. 1083-1086. <https://doi.org/10.1023/A:1026662824249>
23. Chandrasekaran H., M'Saoubi R., Chazal H. Modelling of material flow stress in chip formation process from orthogonal milling and split Hopkinson bar tests. *Machining Science and Technology*, 2005, vol. 9, pp. 131-145. <https://doi.org/10.1081/MST-200051380>
24. Li L., He N. *Proc. of the Fifth Int. Conf. on High Speed Machining. Metz, France, March 14-16, 2006. P. 759-767.*
25. Maker B.N., Zhu X. Input parameters for springback simulation using LS-DYNA. 6th Int. LS-DYNA Conf. Detroit, USA, April, 2000. 12 p. <https://www.dynalook.com/conferences/international-conf-2000/session12-1.pdf/view> (accessed 10 December 2021)
26. Maker B.N., Zhu X. Input parameters for metal forming simulation using LS-DYNA. 3rd European LS-DYNA Conf. Paris, France, June, 2001. 10 p. <https://www.dynalook.com/conferences/european-conf-2001/58.pdf/view> (accessed 30 October 2021)
27. ASTM E384-17 Standard test method for microindentation hardness of materials. ASTM International, 2017. 40 p.

Поступила в редакцию 01.10.2021; после доработки 10.11.2021; принята к опубликованию 12.11.2021

Сведения об авторах

Келлер Илья Эрнстович, дфмн, проф., зав.лаб., Институт механики сплошных сред УрО РАН (ИМСС УрО РАН), 614018, г. Пермь, ул. Академика Королёва, д. 1; e-mail: kie@icmm.ru

Казанцев Александр Владимирович, б/с, ст. преп., Пермский государственный национальный исследовательский университет (ПНИПУ), 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29; e-mail: alexkazancev@bk.ru

Дудин Дмитрий Сергеевич, б/с, инж., ИМСС УрО РАН; асп., ПНИПУ; e-mail: dmitryovj@yandex.ru

Пермяков Глеб Львович, ктн, мнс, ПНИПУ; e-mail: gleb.permyakov@yandex.ru

Карташев Максим Федорович, асп., инж., ПНИПУ; e-mail: svarka@pstu.ru