

УДК 539.374

DOI: 10.32326/1814-9146-2022-84-2-247-258

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ
ОСТАТОЧНОЙ ПОРИСТОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ИЗДЕЛИЯ
ПРИ АДДИТИВНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ
С ПОСЛОЙНОЙ ПРОКОВКОЙ***

© 2022 г.

**Келлер И.Э.^{1,2}, Казанцев А.В.¹,
Дудин Д.С.^{1,2}, Пермьяков Г.Л.¹, Трушников Д.Н.¹**

¹*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Российская Федерация*

²*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Российская Федерация*

kie@icmm.ru

Поступила в редакцию 31.03.2022

Пористость, возникающая в изделиях из алюминий-магниево-сплавов, синтезируемых проволоочно-дуговой наплавкой методом холодного переноса металла, существенно ухудшает характеристики усталостной прочности. Разрабатываемая технология гибридного аддитивного производства с послойной проковкой каждого наплавленного слоя материала способна минимизировать пористость изделия. Для выбора рациональных параметров технологического процесса исследуется эволюция распределения пористости по поперечному сечению линейного элемента после его однократной проковки пневмомолотком. Построена численная модель процесса в пакете LS-DYNA[®], где в качестве связанных уравнений пластической деформации материала и эволюции пористости взяты соотношения Гурсона – Твергарда – Нидлемана. Для определения параметров закона деформационного упрочнения Джонсона – Кука выполнены испытания сплава АМг6 в широком диапазоне скоростей деформации. Воздействие пневмомолотка в численной модели определялось с помощью тензометрированной стальной мишени и подтверждалось по искажениям поперечного сечения прокованного бруса из сплава АМг6. Расчеты, согласно модели, сопоставлены с данными эксперимента, для чего аддитивным производством с послойной проковкой и без нее были изготовлены два линейных сегмента, из поперечных сечений которых подготовлены шлифы, обработанные для визуализации пор. При таком способе обработки давлением уменьшение пористости в пограничном слое заготовки в основном зависит от накопленных пластических деформаций и слабо чувствительно к виду напряженного состояния. Модель позволяет предсказывать размеры области под бойком, зависящие от параметров проковки, в пределах которой существенно снижается пористость. Применение оптимальных режимов проковки способно обеспечить производство качественных изделий в процессах гибридного аддитивного производства.

*Выполнено при финансовой поддержке РФ (грант №21-19-00715).

верхности автоматической установки гибридного аддитивного производства, сконструированной на базе металлообрабатывающего центра (рис. 1а). Образец был прокован пневматическим молотком SA7401H AIRPRO, закрепленным на колонне установки для послойного упрочнения наплавляемой заготовки. Для эффективной проковки наплавленного сегмента был изготовлен цилиндрический боек со сферическим наконечником с радиусом 15 мм (рис. 1б). Экспериментально были определены оптимальные параметры – рабочее давление 0,6 МПа, давление прижима бойка 0,2 МПа и скорость подачи $v = 300$ мм/мин, обеспечивающие равномерность обработки линейного элемента. Два последних параметра независимо изменялись среди уровней 0,2/0,4 МПа и 150/300 мм/мин, рабочее давление пневмомолотка варьированию не подлежало. Выбранный оптимальный режим обработки соответствовал минимально возможному для данного инструмента.

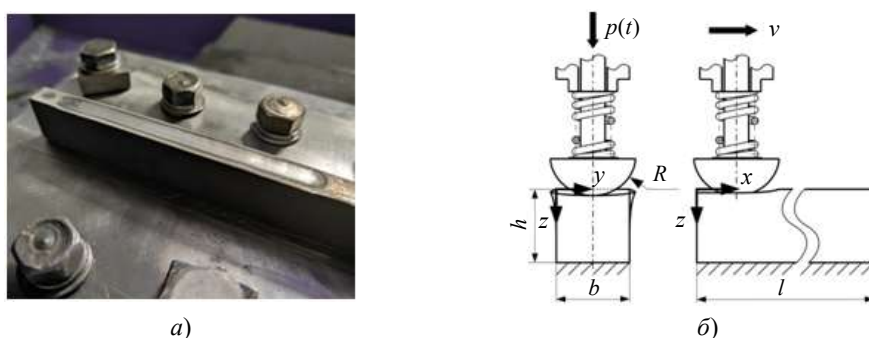


Рис. 1. Контрольный образец (а), прокованный пневмомолотком, и схема процесса (б)

Для определения характеристик ударного воздействия пневмомолотка был выполнен анализ сигналов, полученных с тензометрированного образца-мишени, изготовленного из отрезка длиной 100 мм железнодорожного рельса для узкой колеи Р24 (рис. 2а). Данные с двух тензодатчиков, установленных вертикально на обеих сторонах стенки рельса, поступали на тензостанцию ZET 017-U4. Деформация ε , отфильтрованная от высокочастотных акустических шумов, позволила реконструировать эквивалентную силу инструмента $F(t) = F_0(4/3 + \sin 2\pi\nu t)$, $F_0 = 10$ кН, $\nu = 47$ Гц, вызывающую аналогичные деформации мишени в контрольной точке (рис. 2б), для чего в пакете LS-DYNA® решалась соответствующая упругопластическая задача. Работа пластической деформации за один ход бойка соответствовала энергии удара 20 Дж по паспорту инструмента.

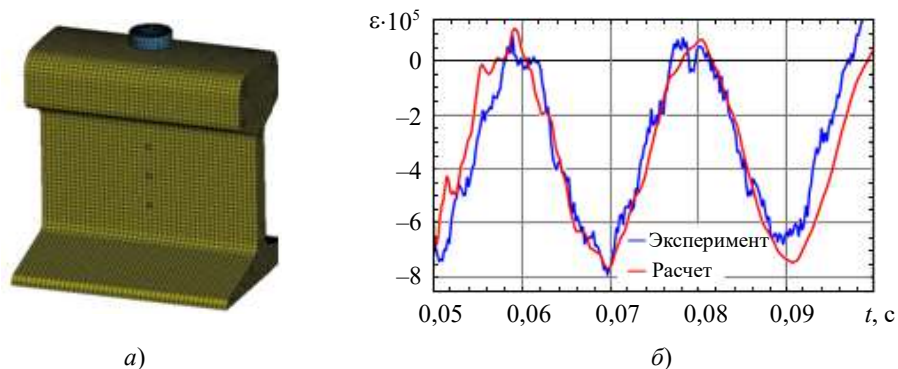


Рис. 2. Расчетная схема проковки мишени (а) и деформации в контрольной точке (б)

Из контрольного образца, прокованного с узкой стороны, на электроэрозионном станке были вырезаны тонкие поперечные слои, плоскопараллельные грани которых отшлифованы. Искажения поперечного сечения образца (рис. 3а), измеренные с помощью цифрового оптического микроскопа Nirox КН-7700, локализовались на глубине с полумаксимумом 5,0 мм от поверхности проковки при ширине лунки 9,3 мм и ее глубине 0,8 мм. Эти искажения воспроизводились в численном расчете проковки образца АМг6 [12] с параметрами воздействия пневмомолотка, определенными выше, обеспечивая их независимое подтверждение.

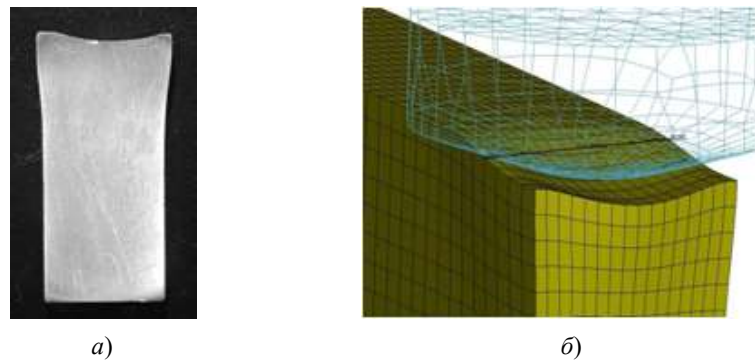


Рис. 3. Искаженное поперечное сечение образца АМг6 (а) и его воспроизведение в численном расчете (б)

2. Модель материала, ее идентификация и численная реализация

Для описания больших пластических и малых упругих деформаций металлов использована стандартная модель [13, 14] в терминах текущего лагранжева подхода в скоростях, численно реализованная в пакете LS-DYNA®. Принята аддитивность упругих и пластических тензоров скорости деформаций, при этом упругий тензор связывается линейно с производной Яуманна тензора напряжений Кирхгофа, а пластический тензор $\dot{\varepsilon}_{ij}^p$ с тензором напряжений Коши σ_{ij} – законом пластического течения, λ – коэффициент пропорциональности

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^p = \lambda \frac{\partial \phi}{\partial \sigma_{ij}}. \quad (1)$$

Для описания пластичности пористого тела используется модель Гурсона – Твергарда – Нидлемана [15, 16], подразумевающая в (1) пластический потенциал $\phi = \phi_{GNT}$, ассоциированный с критерием текучести

$$\phi_{GNT} = \frac{\sigma_i^2}{\sigma_u^2} + 2q_1 f \cdot \text{ch} \left(\frac{3}{2} q_2 \frac{\sigma_m}{\sigma_u} \right) - 1 - (q_1 f)^2 = 0. \quad (2)$$

Здесь $\sigma_i = \sqrt{3s_{ij}s_{ij}/2}$ – интенсивность напряжений; $s_{ij} = \sigma_{ij} - \sigma_m \delta_{ij}$ – компоненты девиатора напряжений; $\sigma_m = \sigma_{kk}/3$ – среднее напряжение; f – объемная доля пор; q_1, q_2 – калибровочные константы; σ_u – предел текучести при одноосном растяжении, для которого 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 $\dot{\varepsilon}_p = \sqrt{2\dot{\varepsilon}_{ij}^p \dot{\varepsilon}_{ij}^p} / 3$ – интенсивность скоростей пластических деформаций; $\varepsilon_p = \int_0^t \dot{\varepsilon}_p dt$ – накопленные пластические деформации; $A, B, C, \varepsilon_*, n$ – константы закона упрочнения.

Для малых значений пористости f порядка $6 \cdot 10^{-3}$, наблюдаемых при аддитивном производстве образцов из АМгб методом холодного переноса металла, применен подход [17, 18], согласно которому при расчете динамической задачи используется пластический потенциал Мизеса $\phi = \phi_M$, следующий из потенциала $\phi = \phi_{GTN}$ в пределе при $f \rightarrow 0$:

$$\phi_M = \frac{\sigma_i^2}{\sigma_u^2} - 1 = 0. \quad (4)$$

Закон пластического течения (1) принимает вид

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^p = \frac{1}{H} \dot{s}_{ij} \frac{s_{ij}}{\sigma_u}, \quad (5)$$

где параметр деформационного упрочнения $H = \partial \sigma_u / \partial \varepsilon_p$ определяется из закона (3). В пакете LS-DYNA® этой модели соответствует стандартный материал MAT_098 [14].

Пористость в таком приближении может быть найдена с помощью соотношения

$$\dot{\varepsilon}_v = \frac{3}{2} q_1 q_2 f \operatorname{sh} \left(\frac{3}{2} q_2 \eta \right) \dot{\varepsilon}_p, \quad (6)$$

вытекающего из (1), (2) с учетом условия текучести $\sigma_i = \sigma_u$, обозначений $\eta = \sigma_m / \sigma_i$ (параметр трехосности) и $\dot{\varepsilon}_v = \dot{\varepsilon}_{kk}^p$ (скорость объемных пластических деформаций) и эволюционного уравнения

$$\dot{f} = (1 - f) \dot{\varepsilon}_v, \quad (7)$$

описывающего изменение пористости [16]. Уравнения (6), (7) интегрируются по времени в точках текучести (при $\dot{\varepsilon}_v > 0$) по рассчитанной истории изменения напряженно-деформированного состояния после решения динамической задачи.

Константы закона упрочнения Джонсона–Кука $A = 140$ МПа, $B = 408$ МПа, $C = 0$, $\dot{\varepsilon}_* = 1$, $n = 0,44$ и модуль упругости $E = 71$ ГПа для АМгб были определены экспериментально, начальная плотность и коэффициент Пуассона принимались равными $\rho_0 = 2640$ кг/м³ и $\nu = 0,3$. Константы q_1, q_2 определяются соответствием результатов расчета экспериментальным данным об изменении пористости.

Квазистатические испытания на растяжение проводились на электромеханической универсальной испытательной машине Shimadzu AG-Xplus со скоростью деформации приблизительно $3 \cdot 10^{-4}$ с⁻¹ при комнатной температуре. Для испытаний из отожженного листового проката на электроэрозионной установке были вырезаны по три плоских образца-лопатки №23 по ГОСТ 1497-84. В ходе испытания видеоэкстензометром регистрировалось продольное относительное перемещение меток на рабочей части образца и относительное сужение рабочей части образца для определения истинных напряжений. Динамические испытания на сжатие цилиндрических образцов выполнены методом Кольского [19, 20] с использованием разрезного стержня Гопкинсона. Испытания проводились при комнатной температуре и значениях скоростей деформации от 200 до 2000 с⁻¹. На рис. 4 приведены экспериментально определенные кривые деформирования в истинных напряжениях и деформациях: кривые синего цвета – при скоростях деформирования $3 \cdot 10^{-4}$ с⁻¹, красного

цвета – при скоростях деформирования $2 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$, черного цвета – $\sigma = 140 + 408\varepsilon^{0,44}$. Динамические кривые находятся в пределах статистической погрешности квазистатических кривых, поэтому аппроксимация законом Джонсона – Кука не содержит скоростной множитель. Для аппроксимации учитывался фрагмент кривых растяжения от предела текучести до предела однородности удлинения.

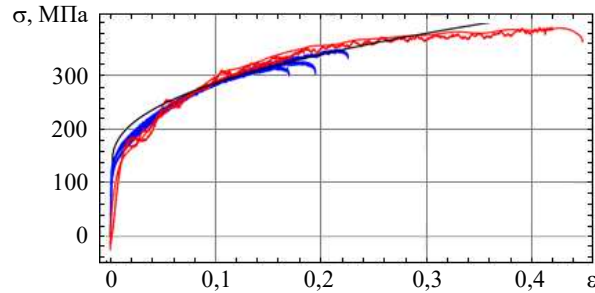


Рис. 4. Кривые деформирования АМгб в истинных напряжениях и логарифмических деформациях и их аппроксимация

Для численного решения контактной динамической задачи методом конечных элементов использовался восьмиузловой параллелепипед с единственной точкой интегрирования. Поперечное сечение дискретизировалось 16 конечными элементами по ширине и высоте. Корректная работа контактирующих узлов и граней элементов была достигнута путем подбора коэффициента контактной жесткости. Коэффициент сухого трения был принят равным нулю. Для регуляризации задачи были подобраны приемлемые коэффициенты диссипации кинетической энергии системы в соответствии с рекомендациями разработчиков программного обеспечения [21]. Рэлеевский коэффициент диссипации $\beta = 0,1$ с обеспечивал фильтрацию акустических составляющих и быстроту счета. Расчет эволюции пористости согласно (6), (7) выполнялся в пакете Wolfram Mathematica[®], для чего история изменения компонент напряжений и деформаций импортировалась из пакета LS-DYNA[®]. Для устойчивого интегрирования уравнений (6), (7) вблизи значения $f = 0$ использовалась их запись через $\ln f$.

3. Вычислительный эксперимент и его подтверждение

Полагалось, что в начальном состоянии внутри образца равномерно распределена пористость с объемной долей 0,5%. После численного моделирования процесса проковки пневмомолотком было выбрано удаленное от концов образца поперечное сечение, для всех 16×16 элементов которого экспортирована история изменения напряженно-деформированного состояния в течение отрезка времени около 3 с, соответствующего проковке пятнадцатимиллиметрового отрезка образца в окрестности выбранного сечения. Далее выполнялся постпроцессинг – расчет эволюции распределения пористости в рассматриваемом сечении согласно соотношениям (6), (7) с калибровочными константами q_1, q_2 .

На рис. 5 приведены распределения пористости в различные моменты времени, последний из которых отвечает установившемуся распределению. Итоговое распределение пористости образует пограничный слой, глубина которого соответствует глубине распределения пластической деформации, рассчитанной и подтвержденной измерениями микротвердости ранее в [12].

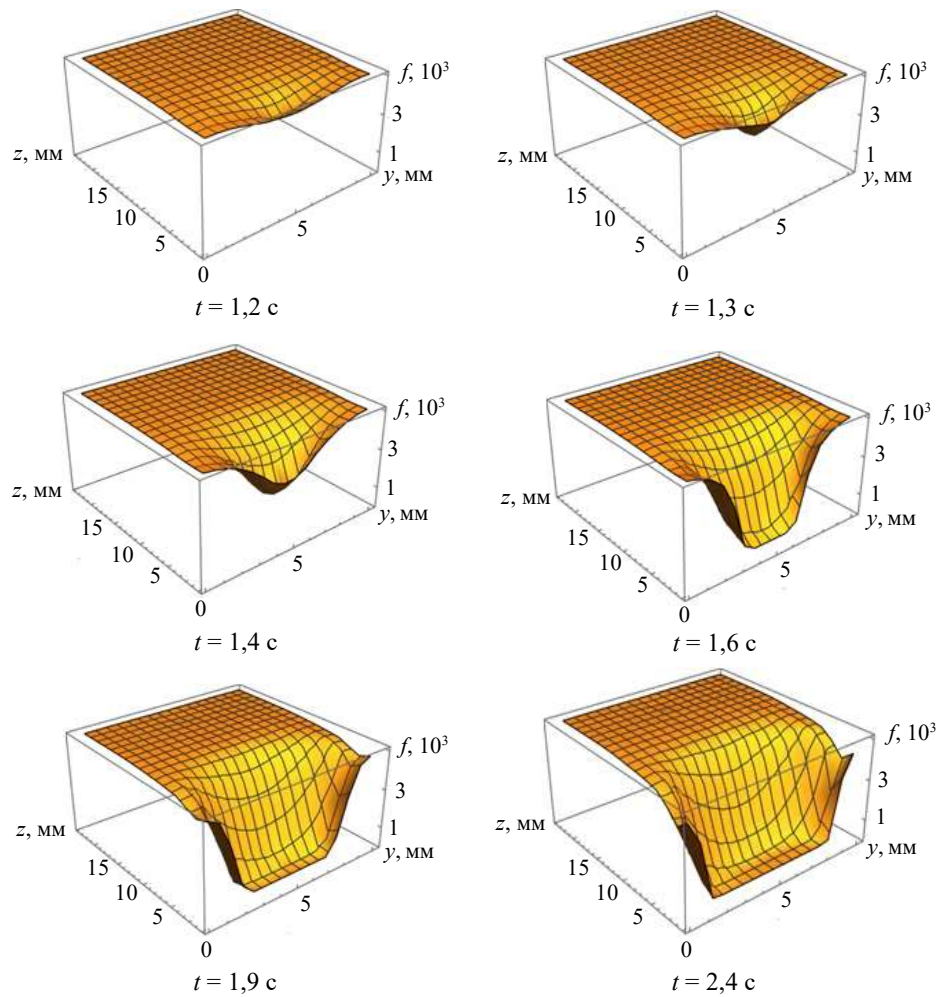


Рис. 5. Распределение пористости по поперечному сечению образца за время прохождения бойка

На рис. 6а показаны профили распределения пористости вдоль линии симметрии поперечного сечения образца в различные моменты времени. По данным расчета в слое глубиной 3 мм прогнозируется практически полное исчезновение пористости, при этом глубина полумаксимума начальной пористости соответствует приблизительно 6 мм. На рис. 6б показаны краевые эффекты распределения остаточной пористости по ширине образца, формирование которых наблюдается на рис. 5, в момент времени 2,4 с. Эти явления вызваны сферической формой бойка, которая обеспечивает эффективность точечной обработки давлением заготовки. Краевые слои, получаемые аддитивным производством, не предназначены для эксплуатации и отрезаются от заготовки.

Переходный процесс на разных глубинах вдоль линии симметрии поперечного сечения образца показан на рис. 7а. Можно заметить, что стационарное распределение остаточной пористости в поперечном сечении повторяет аналогичное распределение накопленных пластических деформаций. Закон эволюции пористости (6), (7) содержит зависимость от вида напряженного состояния. На рис. 7б показана

совместная эволюция параметра трехосности (синяя кривая) и интенсивности скоростей пластических деформаций (желтая кривая) в точке, лежащей на линии симметрии на глубине 5,2 мм (данные численного расчета, содержащие высокочастотные составляющие, были сглажены сплайнами). При таком виде обработки давлением качественный характер этих зависимостей несущественно отличается в различных точках.

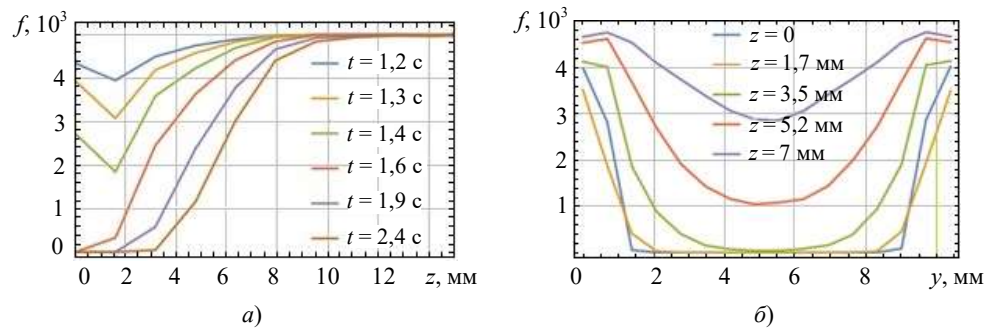


Рис. 6. Распределение пористости вдоль линии симметрии поперечного сечения образца (а), вдоль линий, параллельных стороне проковки (б)

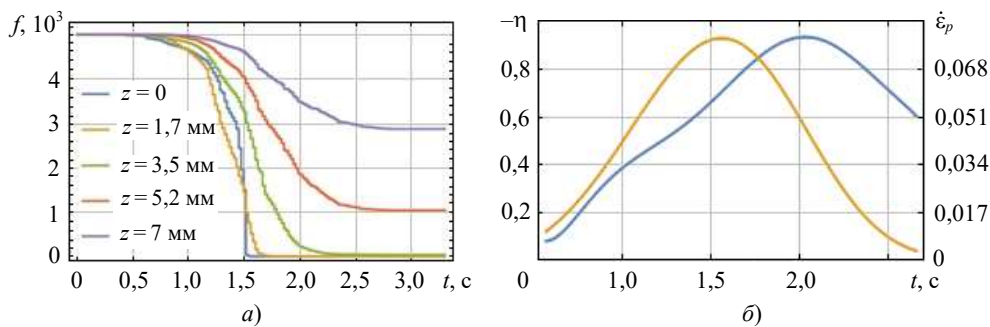


Рис. 7. Эволюция пористости (а) и параметра трехосности и интенсивности скоростей пластических деформаций (б)

Доступные результаты оптической микроскопии распределения пористости по поперечному сечению линейного элемента, полученного проволочно-дуговой наплавкой методом холодного переноса металла с послойной проковкой и без нее, отвечающие минимально возможной степени проковки на имеющемся оборудовании, позволяют судить о качественном соответствии результатов расчета эксперименту (рис. 8, на врезках – фото пор с увеличением 280, микроскоп Niгох КН-7700). Заданные значения констант эволюционной модели $q_1 = q_2 = 1$ (соответствующие принятым в [17, 18]) описывают снижение пористости на порядок на глубине 4 мм от поверхности проковки и практически полное ее исчезновение на глубине 1–3 мм (рис. 8а). Сделанный выбор пневмомолотка при минимальных характеристиках воздействия давлением на объект обработки позволяет в достаточной мере проковывать наплавленный слой АМг6 (толщиной 2–3 мм), чтобы получать качественный материал заготовки в ее рабочей части с пониженной на порядок пористостью. При необходимости константы q_1, q_2 можно определить точнее на основе более детального анализа распределения пористости (рис. 8б) вдоль направления проковки.

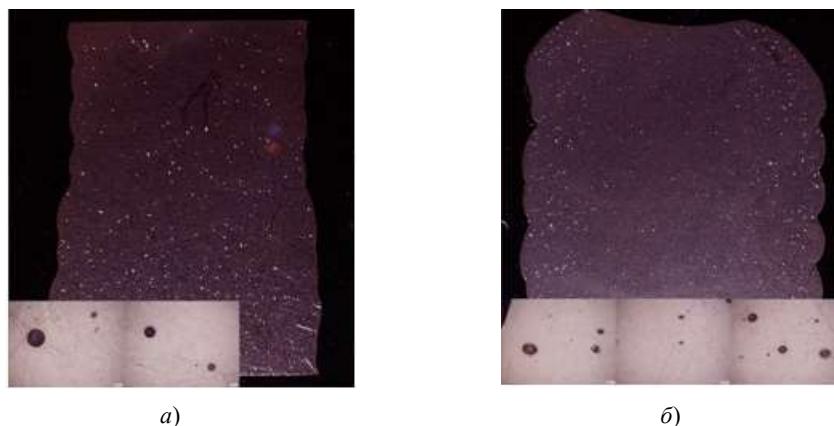


Рис. 8. Распределение пористости по поперечному сечению образца АМг6, наплавленного без послойной проковки (а) и с ней (б)

Заключение

Построена численная модель, позволяющая прогнозировать распределение остаточной пористости в процессах аддитивного производства с послойной проковкой, способная служить гибким инструментом для выбора параметров проковки различных алюминиевых сплавов, склонных к образованию пор. Для калибровки модели необходимы данные о пористости при различных степенях проковки, могут быть использованы данные о распределении пористости вдоль направления проковки.

Авторы выражают благодарность сотрудникам ИМСС УрО РАН Ю.В. Баяндину, М.В. Банникову и В.В. Чудинову и сотруднику ПНИПУ Е.С. Лобову за проведение экспериментальных работ для получения результатов (рис. 2б, рис. 3).

Список литературы

1. Wu B., Pan Z., Ding D., Cuiuri D., Li H., Xu J., Norrish J. A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement. *Journal of Manufacturing Processes*. 2018. Vol. 35. P. 127–139. DOI: 10.1016/J.JMAPRO.2018.08.001.
2. Черемской П.Г., Слезов В.В., Бегехтин В.И. *Поры в твердом теле*. М.: Энергоатомиздат, 1990. 376 с.
3. 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. *Materials Science and Engineering: A*. 2018. Vol. 712. P. 292–301. DOI: 10.1016/J.MSEA.2017.11.113.
4. 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. *Additive Manufacturing*. 2018. Vol. 22. P. 775–783. DOI: 10.1016/J.ADDMA.2018.06.015.
5. Karunakaran K.P., Kapil S., Negi S. Multi-station multi-axis hybrid layered manufacturing system. *Indian Patent*. 2018. Application No 201821038516.
6. Shchitsyn Y.D., Krivonosova E.A., Trushnikov D.N., Olshanskaya T.V., Kartashov M.F., Kartashov M.F., Neulybin S.D. Use of CMT-surfacing for additive formation of titanium alloy workpieces. *Metallurgist*. 2020. Vol. 64. No 1-2. P. 67–74. DOI: 10.1007/s11015-020-00967-0.
7. Shchitsyn Y.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* [Electronic resource]. 2020. No 2. P. 89–94. DOI: 10.17580/tsm.2020.02.12.

8. Shchitsyn Y., 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. No 16. P. 4415-1–4415-18. DOI: 10.3390/ma14164415.
9. Trushnikov D.N., Kartashev M.F., Olshanskaya T.V., Mindibaev M.R., Shchitsyn Y.D., Saucedo-Zendejo F.R. Improving VT6 titanium-alloy components produced by multilayer surfacing. *Russian Engineering Research*. 2021. Vol. 41. Iss. 9. P. 848–850. DOI:10.3103/S1068798X21090264.
10. Киричек А.В., Соловьев Д.Л., Жирков А.А., Федонин О.Н., Федонина С.О., Хандожко А.В. Возможности аддитивно-субтрактивно-упрочняющей технологии. *Вестник Брянского государственного технического университета*. 2016. №4 (52). С. 151–160. DOI: 10.12737/23204.
11. Федонина С.О. Повышение качества синтезированных из проволоки деталей волновым термомодеформационным упрочнением. *Дисс... канд. техн. наук*. Брянский государственный технический университет, 2021. 186 с.
12. Келлер И.Э., Казанцев А.В., Дудин Д.С., Пермьяков Г.Л., Каргашев М.Ф. Искажение формы, локализация пластической деформации и распределение остаточных напряжений при односторонней проковке/обкатке бруса. Применение результатов к аддитивному производству шпангоута с послойной обработкой давлением. *Вычислительная механика сплошных сред*. 2021. Т. 14. №4. С. 434–443. DOI: 10.7242/1999-6691/2021.14.4.36.
13. Khan A.S., Huang S. *Continuum Theory of Plasticity*. New York: John Wiley and Sons, 1995. 421 p.
14. *LS-DYNA® Keyword User's Manual*. Vol. II. Material models. Ver. R13. LSTC, 2021. 1993 p. URL: http://ftp.lstc.com/anonymous/outgoing/jday/manuals/LS-DYNA_Manual_Volume_II_R13.pdf (дата обращения 03 февраля 2022).
15. Gurson A.L. Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth: Part I. Yield criteria and flow rules for porous ductile media. *Journal of Engineering Materials and Technology*. 1977. Vol. 99. Iss. 1. P. 2–15. DOI: 10.1115/1.3443401.
16. Tvergaard V., Needleman A. Analysis of the cup-cone fracture in a round tensile bar. *Acta Metallurgica*. 1984. Vol. 32. Iss. 1. P. 157–169. DOI: 10.1016/0001-6160(84)90213-X.
17. Neukamm F., Feucht M., Haufe A., Roll K. On closing the constitutive gap between forming and crash simulation. *10th International LS-DYNA Users Conference*. 8–10 Jun. 2008. Dearborn, Michigan, USA. P. 12-21–12-32. URL: <http://www.dynalook.com/international-conf-2008/MetalForming3-3.pdf> (дата обращения 03 февраля 2022).
18. Власов А.В., Герасимов Д.А. Реализация модели Гурсо – Твергарда – Нидельмана для расчета процессов холодной объемной штамповки несжимаемых материалов. *Изв. вузов. Машиностроение*. 2017. №8 (689). С. 8–17. DOI: 10.18698/0536-1044-2017-8-8-17.
19. Nicholas T. Tensile testing of materials at high rates of strain. *Experimental Mechanics*. 1981. Vol. 21. Iss. 5. P. 177–185. DOI: 10.1007/BF02326644.
20. Bragov A.M., Lomunov A.K. Methodological aspects of studying dynamic material properties using the Kolsky method. *International Journal of Impact Engineering*. 1995. Vol. 16. Iss. 2. P. 321–330. DOI: 10.1016/0734-743X(95)93939-G.
21. Maker B.N., Zhu X. Input parameters for metal forming simulation using LS-DYNA. *3rd European LS-DYNA Conference*. Paris. 18–19 Jun. 2001. P. 1–11. URL: <https://www.dynalook.com/conferences/european-conf-2001/58.pdf/@@download/file/58.pdf> (дата обращения 03 февраля 2022).

References

1. Wu B., Pan Z., Ding D., Cuiuri D., Li H., Xu J., Norrish J. A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement. *J. Manuf. Processes*. 2018. Vol. 35. P. 127–139. DOI: 10.1016/J.JMAPRO.2018.08.001.
2. Cheremskoy P.G., Slezov V.V., Betekhtin V.I. *Pory v tverdom tele [Pores in a Solid]*. Moscow. Energoatomizdat Publ. 1990. 376 p. (In Russian).
3. 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. A*. 2018. Vol. 712. P. 292–301. DOI: 10.1016/J.MSEA.2017.11.113.

4. 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. P. 775–783. DOI: 10.1016/J.ADDMA.2018.06.015.

5. Karunakaran K.P., Kapil S., Negi S. Multi-station multi-axis hybrid layered manufacturing system. *Indian Patent*. 2018. Application No 201821038516.

6. Shchitsyn Y.D., Krivonosova E.A., Trushnikov D.N., Olshanskaya T.V., Kartashov M.F., Kartashov M.F., Neulybin S.D. Use of CMT-surfacing for additive formation of titanium alloy workpieces. *Metallurgist*. 2020. Vol. 64. No 1-2. P. 67–74. DOI: 10.1007/s11015-020-00967-0.

7. Shchitsyn Y.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* [Electronic resource]. 2020. No 2. P. 89–94. DOI: 10.17580/tsm.2020.02.12.

8. Shchitsyn Y., 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. No 16. P. 4415-1–4415-18. DOI: 10.3390/ma14164415.

9. Trushnikov D.N., Kartashev M.F., Olshanskaya T.V., Mindibaev M.R., Shchitsyn Y.D., Saucedo-Zendejo F.R. Improving VT6 titanium-alloy components produced by multilayer surfacing. *Russian Engineering Research*. 2021. Vol. 41. Iss. 9. P. 848–850. DOI:10.3103/S1068798X21090264.

10. Kirichek A.V., Solovyov D.L., Zhirkov A.A., Fedonin O.N., Fedonina S.O., Khandozhko A.V. Vozmozhnosti additivno-subtraktivno-uprochnyayushchey tekhnologii [Potentialities in additive-subtractive-strengthening techniques]. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Bryansk State Technical University]. 2016. No 4 (52). P. 151–160 (In Russian).

11. Fedonina S.O. Povyshenie kachestva sintezirovannykh iz provoloki detaley volnovym termodeformatsionnym uprochneniem [Improving the quality of parts synthesized from wire by wave thermal deformation hardening]. *Diss... kand. tekhn. nauk* [Cand. Sci. (Engineering) Dissertation]. Bryansk State Technical University. 2021. 186 p. (In Russian).

12. Keller I.E., Kazantsev A.V., Dudin D.S., Permyakov G.L., Kartashev M.F. Iskazhenie formy, lokalizatsiya plasticheskoy deformatsii i raspredelenie ostatochnykh napryazheniy pri odnostoronney prokovke/obkatke brusa. Primenenie rezul'tatov k additivnomu proizvodstvu shpangouta s posloynoy obrabotkoy davleniem [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]. *Vychislitel'naya mekhanika sploshnykh sred* [Computational Continuum Mechanics]. 2021. Vol. 14. No 4. P. 434–443 (In Russian).

13. Khan A.S., Huang S. *Continuum Theory of Plasticity*. New York. John Wiley and Sons. 1995. 421 p.

14. *LS-DYNA® Keyword User's Manual*. Vol. II. Material models. Ver. R13. LSTC, 2021. 1993 p. URL: http://ftp.lstc.com/anonymous/outgoing/jday/manuals/LS-DYNA_Manual_Volume_II_R13.pdf (accessed 03 Feb. 2022).

15. Gurson A.L. Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth: Part I. Yield criteria and flow rules for porous ductile media. *J. Eng. Mater. Technol.* 1977. Vol. 99. Iss. 1. P. 2–15. DOI: 10.1115/1.3443401.

16. Tvergaard V., Needleman A. Analysis of the cup-cone fracture in a round tensile bar. *Acta Metall.* 1984. Vol. 32. Iss. 1. P. 157–169. DOI: 10.1016/0001-6160(84)90213-X.

17. Neukamm F., Feucht M., Haufe A., Roll K. On closing the constitutive gap between forming and crash simulation. *10th International LS-DYNA Users Conference*. 8–10 Jun. 2008. Dearborn, Michigan, USA. P. 12-21–12-32. URL: <http://www.dynalook.com/international-conf-2008/MetalForming3-3.pdf> (accessed 03 Feb. 2022).

18. Vlasov A.V., Gerasimov D.A. Realizatsiya modeli Gurso–Tvergarda–Nidelmana dlya rascheta protsessov kholodnoy ob'emnoy shtampovki neshhimaemykh materialov [The implementation of the Gurson–Tvergaard–Needleman model for simulation of cold forging processes of

incompressible materials]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie [Mechanical Engineering]*. 2017. No 8 (689). P. 8–17 (In Russian).

19. Nicholas T. Tensile testing of materials at high rates of strain. *Exp. Mech.* 1981. Vol. 21. Iss. 5. P. 177–185. DOI: 10.1007/BF02326644.

20. Bragov A.M., Lomunov A.K. Methodological aspects of studying dynamic material properties using the Kolsky method. *Int. J. Impact Eng.* 1995. Vol. 16. Iss. 2. P. 321–330. DOI: 10.1016/0734-743X(95)93939-G.

21. Maker B.N., Zhu X. Input parameters for metal forming simulation using LS-DYNA. *3rd European LS-DYNA Conference*. Paris. 18-19 Jun. 2001. P. 1-11. URL: <https://www.dynalook.com/conferences/european-conf-2001/58.pdf/@@download/file/58.pdf> (accessed 03 Feb. 2022).

MODELING OF THE DISTRIBUTION OF RESIDUAL POROSITY OF A METAL PRODUCT IN ADDITIVE MANUFACTURING WITH LAYER-BY-LAYER FORGING

Keller I.E.^{1,2}, Kazantsev A.V.¹, Dudin D.S.^{1,2},
Permyakov G.L.¹, Trushnikov D.N.¹

¹Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

²Institute of Continuous Media Mechanics of the Ural Branch of Russian Academy of Science,
Perm, Russian Federation

Porosity, which occurs in products made of aluminum-magnesium alloys synthesized by wire-arc surfacing, significantly worsens the characteristics of fatigue strength. The developed technology of hybrid additive manufacturing with layer-by-layer forging of each deposited layer of material is able to minimize the porosity of the product. To select the rational parameters of the technological process, the evolution of the porosity distribution over the cross-section of a linear element after its single forging with a pneumatic hammer is investigated. A numerical model of the process is constructed in the LS-DYNA[®] package, where the Gurson–Tvergaard–Needleman relations are taken as constitutive equations of plastic deformation of the material and porosity evolution. To determine the parameters of the Johnson–Cook hardening law, tests of the AMg6 alloy were performed in a wide range of strain rates. The impact of the pneumatic hammer in the numerical model was calibrated using an accelerometric and strain-gauged steel target, as well as by distortions of the cross-section of a forged bar made of AMg6 alloy. Calculations according to the model are compared with experimental data, for which two linear segments were made by additive manufacturing with and without layer-by-layer forging, from the cross-sections of which the slots processed for pore visualization were prepared. With this method of pressure treatment, the decrease in porosity in the boundary layer of the workpiece mainly depends on the accumulated plastic deformations and does weakly sensitive the appearance of a stressed state. The model allows you to predict the size of the area under the hammer head depending on the processing mode, within which the porosity is eliminated by forging. The use of such modes will ensure the manufacturing of products without residual porosity in the processes of additive manufacturing by surfacing with layer-by-layer forging.

Keywords: hybrid additive manufacturing, wire-arc surfacing, aluminum-magnesium alloys, plasticity, calculation, experiment, porosity, Gurson–Tvergaard–Needleman model.