

УДК 681.6:620.1.08

Г. А. Кононенко^{1,2}, д.т.н., с.д., вчений секретар, ORCID 0000-0001-7446-4105**С. В. Аджамський**^{2,3}, Ph. D., с.н.с, ORCID 0000-0002-6095-8646**Р. В. Подольський**^{1,2}, Ph. D., м.н.с., ORCID 0000-0002-0288-0641**О. А. Сафронова**¹, м.н.с., аспірант, ORCID 0000-0002-4032-4275**Е. А. Шпак**¹, м.н.с., ORCID 0000-0002-6707-0877**А. І. Дерягін**², інженер-конструктор¹ *Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України*² *ТОВ «Адитивні лазерні технології України»*³ *Інститут транспортних систем і технологій НАН України*

ВНУТРІШНІ ЗАЛИШКОВІ НАПРУЖЕННЯ В АДИТИВНОМУ ВИРОБНИЦТВІ. (ОГЛЯД)

Анотація. Адитивне виробництво (далі – сп. АМ) є сучасним комплексом технологій, які дають змогу швидко та якісно створювати вироби з унікальною геометрією, яку неможливо або складно виготовити традиційними способами виробництва. Наразі дослідники приділяють увагу двом великим напрямкам, а саме системам якості АМ та пошуку нових закономірностей у вже доволі відомих матеріалах, що виготовлялися традиційним способом. Внутрішні залишкові напруження в полікристалічних матеріалах класифікують за трьома основними класами, а саме: напруження I роду (макронапруження), II роду (мікронапруження) та III роду (внутрішньокристалічні залишкові напруження). Накопичення внутрішніх залишкових напружень, що утворились під час процесу виготовлення, в результаті локального нагріву і охолодження (швидкості охолодження від 10^3 до 10^8 К/с) може спричинити пошкодження та можливий вихід з ладу деталей під час експлуатації. Таким чином, зменшення залишкових внутрішніх напружень вважається одним з найбільш актуальних та важливих проблем у галузі АМ. В результаті проведеного аналізу робіт було встановлено, що під час процесу виготовлення деталей за допомогою СЛП фактично характерним є те, що розтягуючі внутрішні напруження розвиваються на поверхнях, які врівноважені стискаючими внутрішніми напруженнями в об'ємі. Так як дослідження проводились на зразках простої форми, то отримані результати важко співставляються до деталей виробів складної геометричної форми, що мають істотні зміни геометричних розмірів по перерізу.

Ключові слова: адитивне виробництво, внутрішні залишкові напруження, мікроструктура, термічні напруження, СЛП- технологія.

Посилання для цитування: Внутрішні залишкові напруження в адитивному виробництві. (Огляд) / Г. А. Кононенко, С. В. Аджамський, Р. В. Подольський, О. А. Сафронова, Е. А. Шпак, А. І. Дерягін // *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2023. Вип. 37. С. 434-446. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2023-37-434-446>

Стан питання. Адитивне виробництво є сучасним комплексом технологій, які дають змогу швидко та якісно створювати вироби з унікальною геометрією, яку неможливо або складно виготовити традиційними способами виробництва. Наразі дослідники приділяють увагу двом великим напрямкам, а саме системам якості АМ [1-5] та пошуку нових закономірностей у вже доволі відомих матеріалах [6-10], що виготовлялися традиційним способом.

АМ полягає у побудові виробу за допомогою багаторазового пошарового нанесення матеріалу (металевого порошку, дроту та ін.), його швидкого розплавлення під впливом концентрованого джерела енергії (лазер, пучок електронів та ін.), який сканує поверхню відповідно до заданої траєкторії. Наразі широко затребуваною технологією у АМ є технологія селективного лазерного плавлення (далі – СЛП, англ. SLM). Дана технологія має ряд переваг для виготовлення виробів авіаційно-космічного призначення: можливість отримання тонкостінних деталей з криволінійними каналами, спрощення їхнього виробництва за рахунок зменшення кількості технологічних переходів, застосування комп'ютерних програм і засобів автоматизації, що дозволяють оптимізувати конструкцію виробу, можливість полегшення конструкції для підвищення коефіцієнта «Buy-to-Fly». Але, як і всі технології виробництва, дана технологія має ряд недоліків та проблем.

Залишкові внутрішні напруження є однією з особливостей металевих матеріалів, виготовлених шляхом пошарового сплавлення за СЛП-технологією, але вони можуть значно впливати на механічні властивості та геометричні параметри [11]. Їх присутність є особливо важливою для матеріалів АМ, що неминуче призводять до значних внутрішніх напружень. Накопичення внутрішніх залишкових напружень, що утворились під час процесу виготовлення, в результаті локального нагріву і охолодження (швидкості охолодження від 10^3 до 10^8 К/с) [1] може спричинити пошкодження та можливий вихід з ладу деталей під час експлуатації [12]. Таким чином, зменшення залишкових внутрішніх напружень вважається одним з найбільш актуальних та важливих проблем у галузі АМ [1, 11]. З урахуванням цього, питання зменшення шкідливого впливу залишкових внутрішніх напружень потребує фундаментального розуміння їх впливу на геометричні параметри та службові характеристики матеріалів АМ.

Внутрішні залишкові напруження в полікристалічних матеріалах класифікують за трьома основними класами, а саме: напруження I роду (макронапруження), II роду (мікронапруження) та III роду (внутрішньокристалічні залишкові напруження) [68-69]. Макронапруження врівноважуються в об'ємі всього дослідного зразка

чи виробу. Орієнтація даних напружень в більшості випадків пов'язана з геометрією виробу. Досягнення певного рівня напружень викликає деформування (викривлення (рис. 1, а) та розтріскування (рис. 1, б) виробу [1]. Але слід зазначити, що деформація (викривлення) деталі відбувається коли макронапруження перевищує границю плинності [1]. Ще більш небезпечним є здатність макронапружень проявлятися згодом, коли вже після обробки готова деталь механізму починає раптово і швидко зношуватися, внаслідок виходу розмірів за границю допуску.

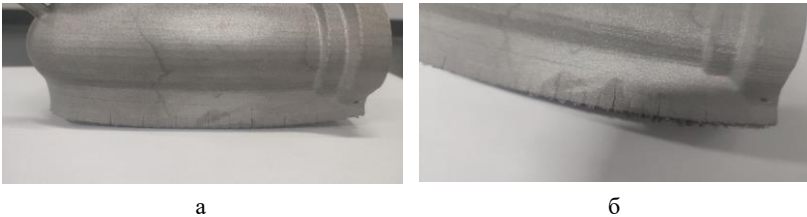


Рисунок 1 – Дефекти деталі від макронапруження: а – викривлення, б – розтріскування.

Мікронапруження змінюються в межах окремих зерен та кристалічних комірок, в більшості випадків це пов'язують з анізотропністю кристалів, орієнтацією кристалографічних площин, наявністю інших фаз та ін [13]. Внутрішньокристалічні залишкові напруження пов'язані з неоднорідною мікроструктурою в зерні, такою як осередки дислокацій всередині зерен, в більшості випадків дані напруження самоврівноважуються в рамках довжини зерна [14]. Загалом, мікронапруження виникають після обробки матеріалу і згодом розвиваються під дією прикладеного навантаження. На рисунку 2 представлено різні типи залишкових внутрішніх напружень в полікристалічних матеріалах. Слід зазначити, що питанням залишкових внутрішніх напружень приділяли увагу і в традиційному способі виробництва, але переважно щодо макронапружень в деталях після процесів прокатки, термічної чи механічної обробки.

Причинами формування внутрішніх напружень у СЛП-виробах є висока швидкість охолодження при затвердінні ванни розплаву в межах одного треку (швидкості охолодження від 10^3 до 10^8 К/с), великий градієнт температур між рідким розплавом ванни і попередніми твердими шарами виробу [1]. Особливо це актуально для сталей та сплавів [1], оскільки для даних матеріалів характерний низький коефіцієнт теплопередачі. Нерівномірність розподілу залишкових напружень пов'язана з такою особливістю технології, як відмінності в умовах охолодження треку, який формує бічну поверхню

деталі, і треку в центрі її перерізу, що обумовлює різницю тепловідведення на кордоні порошок-метал і метал-метал відповідно. На рисунку 3 схематично зображено вплив підведення тепла утворюючи градієнт напруження в окремих шарах під час нагрівання та охолодження під час процесу СЛП.

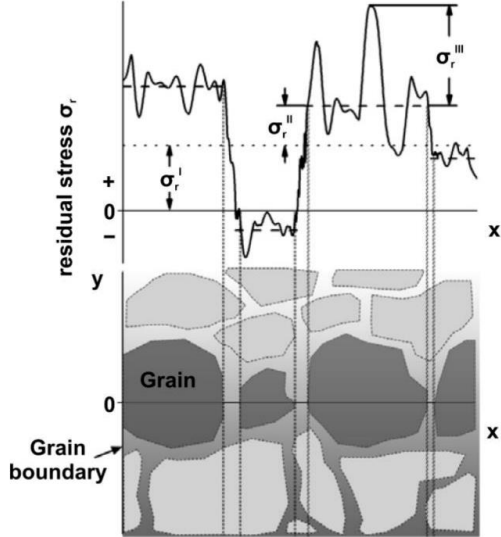


Рисунок 2 – Схема різних типів внутрішніх напружень у полікристалічних матеріалах: σ^I – макронапруження, σ^{II} – мікронапруження, σ^{III} – внутрішньокристалічні напруження [15].

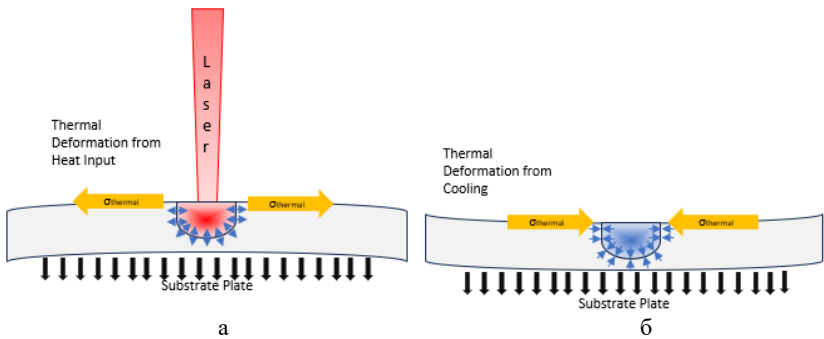


Рисунок 3 – Схема, що демонструє вплив нагрівання (а) та охолодження (б) на градієнт внутрішніх напружень під час СЛП процесу [16].

Внаслідок вище зазначеного термічного впливу наступна частина шару зазнає дії сил розтягнення в той час, як попередній нанесений шар зазнає стискаючих напружень. Таким чином, дана проблема проявляється, коли наступні шари ван розплаву обмежують теплове розширення та звуження шарів безпосередньо під басейном розплаву попередніх шарів. Слід зазначити, що даний ефект може відбуватися одночасно на глибині кількох шарів, таким чином спричинити пружну деформацію всередині шарів, що призведе до виникнення градієнта напруження між шарами [16], на рисунку 4 [17] зображена схема, що ілюструє даний ефект графічно. Таким чином встановлено, що на внутрішні залишкові напруження чинять вплив багато виробничих параметрів наприклад, кількість і товщина шарів [16], геометрія, стратегія сканування [18] і щільність лазерної енергії [16].

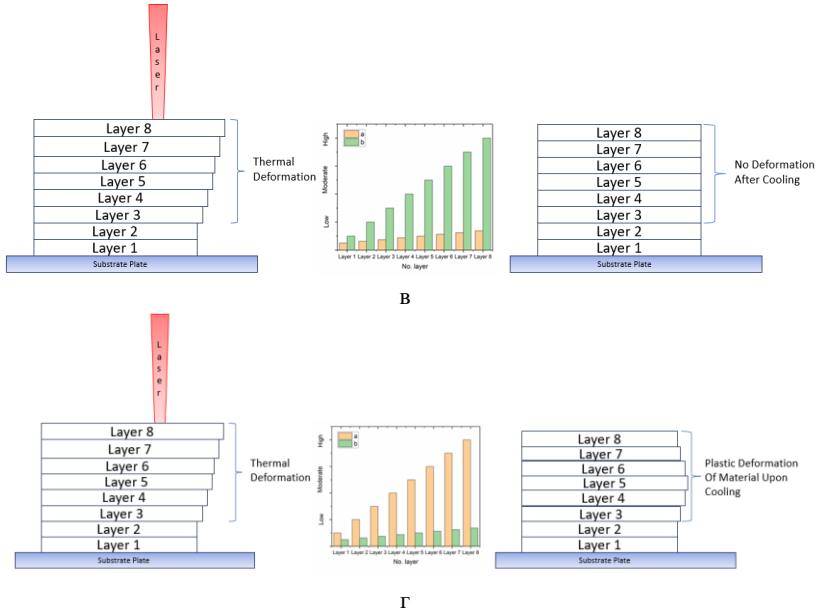


Рисунок 4 - Напруження між шарами: а – термічна напруга між шарами, б – термічна деформація в шарах, в - шари вільного ковзання, закріплені на будівельній плиті, г- сплавлені шари, закріплені на будівельній пластині [17].

Шари в залежності від геометрії розбиваються на зони, кожній зоні присвоюється індивідуальний ідентифікатор, згідно з яким будуються траєкторії руху і встановлюються типи треків з своїми параметрами потужності і швидкості руху лазерного променя. Дані ідентифікатори можна рознести на три основні групи: нижній шар

(down-skin), внутрішній шар (in-skin), верхній шар (up-skin) (рис. 5, а). При цьому в кожній групі створюються свої підгрупи: заливка (hatches), контур (border), постконтур (fill border) як показано на рис. 5, б. Штрихування лазером або стратегія руху променя лазера – це траєкторія проходження лазерним променем по поверхні шару металевого порошку при заливці основного тіла і контурів виробу [19]. В процесі СЛП тепловий градієнт виникає від верхнього шару до попереднього шару, що призводить до того, що зерна мають тенденцію до зростання вздовж напрямку теплового потоку, і є пріоритетний напрям зростання зерна. Таким чином, один напрямок стає основним напрямком росту зерен після затвердіння шару. Тому стратегія лазерного сканування чинить істотний вплив на текстуру виготовленого виробу за технологією СЛП [15].

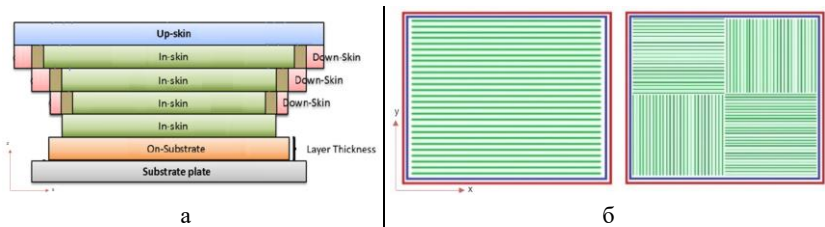


Рисунок 5 – Формування шарів в напрямку зростання деталі (а), підгрупи треків (б) [21].

Деякі особливості геометрії деталей (краї, що звисають, похилі поверхні, тонкі стінки, тонкий профіль, змінний переріз, отвори) вимагають спеціальних умов сканування, наприклад, подвійний обхід по контуру тонкого профілю, перерозподіл енергії лазерного випромінювання в пучку, а також, можливо, зміна потужності і швидкості сканування лазерного променя.

Майже всі передові процеси виготовлення деталей, застосовуючи які прагнуть підвищити їх якість, зосереджуються на мінімізації ефектів внутрішніх напружень [20].

В результаті поведінки матеріалу зразків, надрукованих при різних стратегіях побудови, формуються області напружень, що розтягуються або стискаються, які можна представити у вигляді істинної діаграми розтягування (рис. 6), яка б показала відношення між подовженням і напруженням. При перевищенні границі плинності, метал демонструє пластичну поведінку, що характеризується невідновлюваною пластичною деформацією, і залежність деформації від напруження стає нелінійною.

При формуванні залишкових напружень крім високих швидкостей охолодження і постійного сусідства рідкого і твердого металу в

процесі побудови деталі, важливим є нерівномірність розподілу залишкових напружень, пов'язаних з геометрією: наявність виступаючих частин, переходів від товстого до тонкого перетину, гострокутних елементів та отворів.

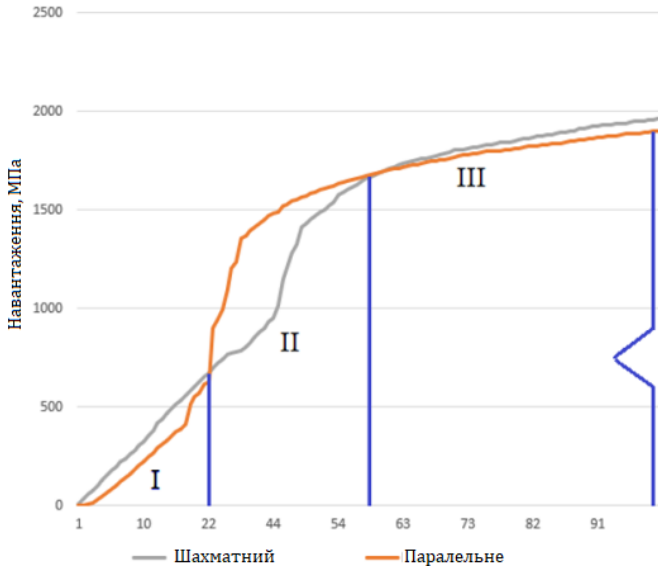


Рисунок 6 – Справжня діаграма розтягування зразків з паралельною і шаховою стратегією сканування: I – ділянка пропорційності, II – ділянка плинності, III – ділянка самозміцнення [22].

При виготовленні деталей за технологією СЛП в області контуру (краю) масивного виробу виникають напруження, які можуть призводити до утворення ряду дефектів [1]: зміни вихідної форми (викривлення) виробу [1] (рис. 1, а), утворення пір і розшарування (рис. 7, а) між новим і холодушим металом через зміни його геометрії, виникнення мікротріщин (рис. 7, б), формування вираженої текстури, що призводить до зниження механічних властивостей і їх анізотропності.

Пошук шляхів попередньої оцінки і розробка заходів щодо зниження залишкових напружень при виготовленні деталей за технологією СЛП є актуальним завданням сучасного матеріалознавства. Сучасний підхід полягає в застосуванні раціональних параметрів та стратегій сканування, але також з врахуванням впливу на формування дефектів та мікроструктури [1,

22, 23]. Альтернативним підходом є використання термообробки для зняття внутрішніх напружень, щоб зменшити величину та наступний вплив внутрішніх напружень [24]. Застосування термічної обробки також повинно бути збалансованим з огляду на вартість виробництва, бажану мікроструктуру та необхідні механічні властивості сплавів.

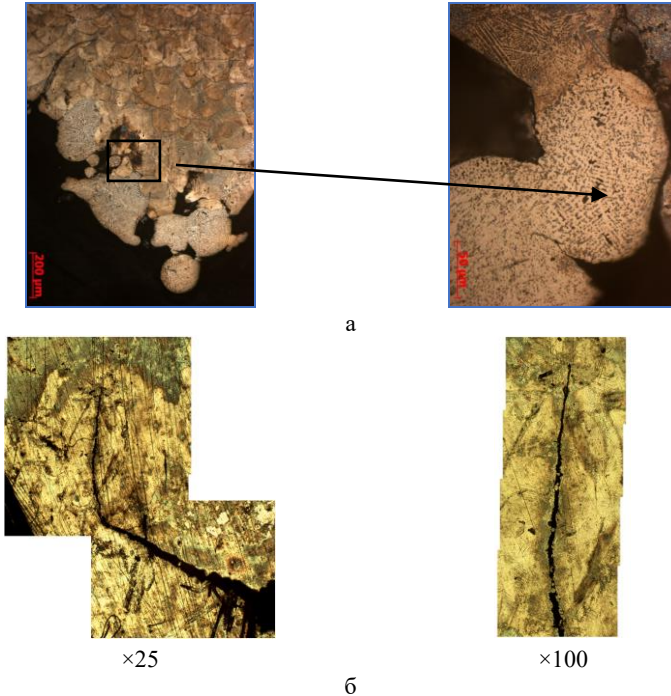


Рисунок 7 – Дослідження мікроструктури з дефектом: а - розшарування (Inconel 718), б - дефект «тріщина» (Ti6Al4V).

Висновки

В результаті проведеного аналізу робіт було встановлено, що під час процесу виготовлення деталей за допомогою СЛП фактично характерним є те, що розтягуючі внутрішні напруження розвиваються на поверхнях, які врівноважені стискаючими внутрішніми напруженнями в об'ємі. Так як дослідження проводились на зразках простої форми, то отримані результати важко співставляються до деталей виробів складної геометричної форми, що мають істотні зміни геометричних розмірів по перерізу.

Перелік посилань

1. Adjamskiy S., Kononenko G., Podolskiy R., Badyuk S. Implementation Of Selective Laser Melting Technology In Ukraine. Kyiv: Naukova Dumka. 2022. 116 p. <https://doi.org/10.15407/978-966-00-1856-3>
2. Fu D., Li X., Zhang M., Wang M., Zhang Z., Qu S. Influence of Effective Laser Energy on the Structure and Mechanical Properties of Laser Melting Deposited Ti6Al4V Alloy. *Materials (Basel)*. 2020. 13(4). P. 962. <https://doi.org/10.3390/ma13040962>
3. Gong H., Hengfeng Gu, Zeng K., Dilip J.J.S, Pal D., Stucker B. Melt Pool Characterization for Selective Laser Melting of Ti-6Al-4V Pre-alloyed Powder. *Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin Texas*. 2014. P. 256-267 <https://doi.org/10.26153/tsw/15682>
4. Dilip J. J. S., Anam M. A., Pal D., Stucker B. A short study on the fabrication of single track deposits in SLM and characterization. *Solid Freeform Fabrication 2016: Proceedings of the 26th Annual International. Solid Freeform Fabrication Symposium – An Additive Manufacturing Conference*. 2016. P. 1644-1659.
5. Аджамський С. В., Кононенко Г. А., Подольський П. В. Обґрунтування технологічних режимів для формування стабільного одиничного треку при товщині шару 30 мкм зі сплаву INCONEL 718. *Системні технології*. 2023. №2(145). P. 43-52. <https://doi.org/10.34185/1562-9945-2-145-2023-05>
6. Adjamskiy S., Kononenko G., Podolskiy R., Baduk S. Studying the Influence of Orientation and Layer Thickness on the Physico-Mechanical Properties of Co-Cr-Mo Alloy Manufactured by the SLM Method. *Science and Innovation*. 2022. № 18(5). P.85–94. <https://doi.org/10.15407/scine18.05.085>
7. Adzhamskiy S. V., Kononenko H. A., Podolskiy R. V. Analysis of Structure after Heat Treatment of Inconel 718 Heat-Resistant Alloys Made by SLM-Technology. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol*. 2021. №7(43). P. 909–924. <https://doi.org/10.15407/mfint.43.07.0909>.
8. Kruth J.-P., Leu M.-C., Nakagawa T. Progress in additive manufacturing and rapid prototyping. *CIRP Ann.-Manuf. Technol*. 1998. №47(2). P. 525–540.
9. Donachie M. J., Donachie S. J. Superalloys: a technical guide, second edition [Elektronisk resurs]. *ASM International*. 2002. P. 409.
10. Deng D. Additively Manufactured Inconel 718: Microstructures and Mechanical Properties. *Linköping: Linköping University Electronic Press*. 2018. P. 69.
11. Chen W., Voisin T., Zhang Y., Forien J.-B., Spadaccini C. M., McDowell D.L., Zhu T., Wang Y. M. Microscale residual stresses in additively manufactured stainless steel. *Nat Commun*. 2019. №10. P.4338. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-12265-8>
12. Herzog D., Seyda V., Wycisk E., Emmelmann C. Additive manufacturing of metals. *Acta Mater*. 2016. №117. P.371–392.
13. Repper J., Link P., Hofmann M., Kremaszky C., Petry W., Werner E. Interphase microstress measurements in IN 718 by cold neutron diffraction. *Appl. Phys. A*. 2010. №99. P.65–569. <https://doi.org/10.1007/s00339-010-5607-2>
14. Clausen B., Lorentzen T., Leffers T. Self-consistent modelling of the plastic deformation of FCC polycrystals and its implications for diffraction measurements of internal stresses. *Acta Mater*.1998. №46. P. 3087–3098.
15. Mo F. J., Sun G. G., Li J., Zhang C. S., Wang H., Chen Y., Liu Z., Yang Z.

K., Li H. J., Yang Z. L. Recent Progress of Residual Stress Distribution and Structural Evolution in Materials and Components by Neutron Diffraction Measurement at RSND. *Quantum Beam Sci.* 2018. №2. P.15.

16. Mercelis P., Kruth J. P. Residual stresses in selective laser sintering and selective laser melting. *Rapid Prototyp. J.* 2006. №12. P.254–265.

17. Patterson A. E., Messimer S. L., Farrington P. A. Overhanging Features and the SLM/DMLS Residual Stresses Problem: Review and Future Research Need. *Technologies.* 2017. №5. P.15.

18. Schmidt M., Merklein M., Bourell D., Dimitrov D., Hausotte T., Wegener K., Overmeyer L., Vollertsen F., Levy G. N. Laser based additive manufacturing in industry and academia. *CIRP Ann.-Manuf. Technol.* 2017. №66. P.561–583.

19. Zheng B., Zhou Y., Smugeresky J. E., Schoenung J. M., Lavernia E. J. Thermal behavior and microstructure evolution during laser deposition with laser-engineered net shaping: Part II. Experimental investigation and discussion. *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.* 2008. Vol. 39, № 9. P. 2237–2245.

20. Аджамський С. В., Кононенко Г. А., Подольський Р. В. Вплив параметрів SLM-процесу на формування області кордонів деталей з жароміцного нікелевого сплаву Inconel 718. *Космічна наука і технологія.* 2021. 27, № 6 (133). С. 105-114. <https://doi.org/10.15407/knit2021.06.105>

21. Аджамський С. В., Кононенко А. А. Закономерности влияния параметров процесса выборочного лазерного плавления (SLM) на формирование единичного слоя из жаропрочного никелиевого сплава Inconel 718. *Лучевые технологии в сварке и обработке материалов.* 2019. Вып. 9. С. 5-11.

22. Аджамський С. В., Кононенко А. А., Подольський Р. В. Исследование влияния режимов SLM-процесса на качество в области контура изделий. *Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Університетська наука - 2020».* 2020. С. 157–158.

23. Кононенко Г. А., Аджамський С. В., Подольський Р. В., Сафронова О. А., Шпак Е. А. Порівняльні дослідження механічних властивостей зразків сталі 316L, виготовлених на машині ALFA-150 на відповідність світовим аналогам. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії.* 2022. Вып. 36. С. 370-378. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2022-36-370-378>.

24. Bartlett J. L., Li X. An overview of residual stresses in metal powder bed fusion. *Addit. Manuf.* 2019. №27. P.131–149.

References

1. Adjamskiy, S., Kononenko, G., Podolskiy, R., & Badyuk, S. (2022). Implementation Of Selective Laser Melting Technology In Ukraine. *Naukova Dumka.* <https://doi.org/10.15407/978-966-00-1856-3>

2. Fu, D., Li, X., Zhang, M., Wang, M., Zhang, Z., & Qu, S. (2020). Influence of Effective Laser Energy on the Structure and Mechanical Properties of Laser Melting Deposited Ti6Al4V Alloy. *Materials (Basel)*, 13(4), 962. <https://doi.org/10.3390/ma13040962>

3. Gong, H., Hengfeng, Gu., Zeng K., Dilip, J. J. S., Pal, D., & Stucker, B. (2014). Melt Pool Characterization for Selective Laser Melting of Ti-6Al-4V Pre-alloyed Powder. *Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin Texas*, 256-267. <https://doi.org/10.26153/tsw/15682>

4. Dilip, J. J. S., Anam, M. A., Pal, D., & Stucker, B. (2016). A short study on the fabrication of single track deposits in SLM and characterization. *Solid Freeform Fabrication 2016: Proceedings of the 26th Annual International. Solid Freeform Fabrication Symposium – An Additive Manufacturing Conference*, 1644-1659
5. Adzhamskiy, S. V., Kononenko, H. A., & Podolskiy, R. V. (2023). Justification of technological modes for the formation of a stable single track with a layer thickness of 30 μm from the INCONEL 718 alloy. *System technologies*, 2(145), 43-52. <https://doi.org/10.34185/1562-9945-2-145-2023-05>
6. Adjamskiy, S., Kononenko, G., Podolskiy, R., & Baduk, S. (2022). Studying the Influence of Orientation and Layer Thickness on the Physico-Mechanical Properties of Co-Cr-Mo Alloy Manufactured by the SLM Method. *Science and Innovation*, 18(5), 85–94. <https://doi.org/10.15407/scine18.05.085>
7. Adzhamskiy, S. V., Kononenko, H. A., & Podolskiy, R. V. (2021). Analysis of Structure after Heat Treatment of Inconel 718 Heat-Resistant Alloys Made by SLM-Technology. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol*, 7(43), 909–924. <https://doi.org/10.15407/mfint.43.07.0909>
8. Kruth, J.-P., Leu, M.-C., & Nakagawa, T. (1998). Progress in additive manufacturing and rapid prototyping. *CIRP Ann.-Manuf. Technol*, 47(2), 525–540.
9. Donachie, M. J., & Donachie, S. J. (2002). Superalloys: a technical guide, second edition [Elektronisk resurs]. *ASM International*. P. 409
10. Deng, D. (2018). Additively Manufactured Inconel 718: Microstructures and Mechanical Properties. *Linköping University Electronic Press*, 69
11. Chen, W., Voisin, T., Zhang, Y., Forien, J.-B., Spadaccini, C. M., McDowell, D. L., Zhu, T., & Wang, Y. M. (2019). Microscale residual stresses in additively manufactured stainless steel. *Nat Commun*, 10, 4338. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-12265-8>
12. Herzog, D., Seyda, V., Wycisk, E., & Emmelmann, C. (2016). Additive manufacturing of metals. *Acta Mater*, 117, 371-392
13. Repper, J., Link, P., Hofmann, M., Krempaszy, C., Petry, W., & Werner, E. (2010). Interphase microstress measurements in IN 718 by cold neutron diffraction. *Appl. Phys. A*, 99, 65–569. <https://doi.org/10.1007/s00339-010-5607-2>
14. Clausen, B., Lorentzen, T., & Leffers, T. (1998). Self-consistent modelling of the plastic deformation of FCC polycrystals and its implications for diffraction measurements of internal stresses. *Acta Mater*, 46, 3087-3098
15. Mo, F. J., Sun, G. G., Li, J., Zhang, C. S., Wang, H., Chen, Y., Liu, Z., Yang, Z. K., Li, H. J., & Yang, Z. L. (2018). Recent Progress of Residual Stress Distribution and Structural Evolution in Materials and Components by Neutron Diffraction Measurement at RSND. *Quantum Beam Sci.*, 2, 15
16. Mercelis, P., & Kruth, J. P. (2006) Residual stresses in selective laser sintering and selective laser melting. *Rapid Prototyp. J.*, 12, 254-265
17. Patterson, A. E., Messimer, S. L., & Farrington, P. A. (2017). Overhanging Features and the SLM/DMLS Residual Stresses Problem: Review and Future Research Need. *Technologies*, 5, 15
18. Schmidt, M., Merklein, M., Bourell, D., Dimitrov, D., Hausotte, T., Wegener, K., Overmeyer, L., Vollertsen, F., & Levy, G. N. (2017). Laser based additive manufacturing in industry and academia. *CIRP Ann.-Manuf. Technol*, 66, 561-583

19. Zheng, B., Zhou, Y., Smugeresky, J.E., Schoenung, J. M., & Lavernia, E. J. (2008). Thermal behavior and microstructure evolution during laser deposition with laser-engineered net shaping: Part II. Experimental investigation and discussion. *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.*, 39(9), 2237-2245

20. Adzhamskiy, S. V., Kononenko, H. A., & Podolskiy, R. V. (2021). The influence of SLM process parameters on the formation of the boundary region of parts made of heat-resistant nickel alloy Inconel 718. *Space science and technology*, 27, 6(133), 105-114. <https://doi.org/10.15407/knit2021.06.105>

21. Adzhamskiy, S. V., & Kononenko, A. A. (2019). Zakonomernosty vliyaniya parametrov protsessa vyborochnoho lazernoho plavlenniya (SLM) na formirovaniye edynichnogo sloia yz zharoprochnoho nykelyevoho splava Inconel 718 [Patterns of influence of the parameters of the selective laser melting (SLM) process on the formation of a single layer from the heat-resistant nickel alloy Inconel 718]. *Beam technologies in welding and material processing*, 9, 5-11

22. Adzhamskiy, S. V., Kononenko, H. A., & Podolskiy, R. V. (2020). Yssledovaniye vliyaniya rezhymov SLM-protsessa na kachestvo v oblasti kontura yzdelyi [Investigation of the influence of SLM process modes on quality in the area of product contours]. Materials of the international scientific and technical conference "University Science - 2020", 157-158

23. Kononenko, H. A., Adzhamskiy, S. V., Podolskiy, R. V., Safronova, O. A., & Shpak, O. A. (2022). Comparative studies of the mechanical properties of 316L steel samples produced on the ALFA-150 machine in accordance with world analogues. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 36, 370-378. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2022-36-370-378>

24. Bartlett, J. L., & Li, X. (2019). An overview of residual stresses in metal powder bed fusion. *Addit. Manuf.*, 27, 131-149

G. A. Kononenko^{1,2}, D. Sc. (Tech.), Senior Researcher, Scientific Secretary, ORCID 0000-0001-7446-4105

S. V. Adjamskiy^{2,3}, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0002-6095-8646

R. V. Podolskiy^{1,2}, Ph. D. (Tech.), Junior Researcher, ORCID 0000-0002-0288-0641

E. A. Safronova¹, Junior Researcher, Ph. D. Student, ORCID 0000-0002-4032-4275

E. A. Shpak¹, Junior Researcher, ORCID 0000-0002-6707-0877

A. I. Deryagin², Design Engineer

¹ *Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine*

² *LLC "Additive laser technologies of Ukraine"*

³ *Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine*

INTERNAL RESIDUAL STRESSES IN ADDITIVE MANUFACTURING. (OVERVIEW)

Abstract. Additive manufacturing (AM) is a modern set of technologies that make it possible to quickly and qualitatively create products with a unique geometry that are impossible or difficult to manufacture by traditional methods of production. Currently, researchers pay attention to two major areas, namely AM quality systems

and the search for new regularities in already well-known materials that were produced in a traditional way. Internal residual stresses in polycrystalline materials are classified according to three main classes, namely: stress of type I (macrostress), type II (microstress) and type III (intracrystalline residual stress). Accumulation of internal residual stresses generated during the manufacturing process as a result of local heating and cooling (cooling rates from 103 to 108 K/s) can cause damage and possible failure of parts during service. Thus, the reduction of residual internal stresses is considered one of the most urgent and important problems in the field of AM. As a result of the analysis of the works, it was established that during the process of manufacturing parts with the help of SLP, it is actually characteristic that tensile internal stresses develop on the surfaces, which are balanced by compressive internal stresses in the volume. Since the research was carried out on samples of a simple shape, the obtained results are difficult to compare with the details of products of a complex geometric shape, which have significant changes in the geometric dimensions of the cross-section.

Key words: Alfa-150, 316L, microstructure, mechanical tests, SLM technology.

For citation: Kononenko, G. A., Adjamskiy, S. V., Podolskiy, R. V., Safronova, E. A., Shpak, E. A., & Deryagin, A. I. (2023). Internal residual stresses in additive manufacturing. (Overview). *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 37, 434-446. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2023-37-434-446>

*Стаття надійшла до редакції збірника 02.10.2023 р.
Рекомендовано до друку редколегією збірника (Протокол № 9 від 19.12.2023 р.)*