

Список литературы

1. Beaman JJ, Barlow JW, Bourell DL, Crawford RH, Marcus Harris L, McAlea Kevin P: Solid freeform fabrication: a new direction in manufacturing. Kluwer Academic Publishers, 1997, Norwell, pp 25–49
2. Murr L. E. et al. Metal fabrication by additive manufacturing using laser and electron beam melting technologies //Journal of Materials Science & Technology. – 2012. – Т. 28. – №. 1. – С. 1-14.
3. Murr L. E. Metallurgy of additive manufacturing: Examples from electron beam melting //Additive Manufacturing. – 2015. – Т. 5. – С. 40-53.
4. Liu Y. J. et al. Microstructure, defects and mechanical behavior of beta-type titanium porous structures manufactured by electron beam melting and selective laser melting //Acta Materialia. 2016. – Т. 113. – С. 56-67.
5. Körner C. Additive manufacturing of metallic components by selective electron beam melting–areview //International Materials Reviews. – 2016. – Т. 61. – №. 5. – С. 361-377.
6. Zhao S. et al. Compressive and fatigue behavior of functionally graded Ti-6Al- 4V meshes fabricated by electron beam melting //Acta Materialia. – 2018. – Т. 150. – С. 1-15.
7. Lim G. et al. Residual Stresses in Ti-6Al- 4V Parts Manufactured by Direct Metal Laser Sintering and Electron Beam Melting //British Society of Strain Measurement. – 2017.
8. Rausch A.M., Kung V.E., Pobel C., Markl M., Korner C. Predictive Simulation of Process Windows for Powder Bed Fusion Additive Manufacturing: Influence of the Powder Bulk Density. MATERIALS 10(10) 1117 (2017) DOI: 10.3390/ma10101117
9. Yan W.T. Ge, W.J. Qian Y., Lin S., Zhou B., Liu W.K., Lin F., Wagner G.J.: Multi-physics modeling of single/multiple-track defect mechanisms in electron beam selective melting. ACTA MATERIALIA, vol 134 (2017), pp 324-333, DOI: 10.1016/j.actamat.2017.05.061
10. Yan W.T., Qian Y., Ma W.X., Zhou B., Shen Y.X., Lin F.: Modeling and Experimental Validation of the Electron Beam Selective Melting Process. ENGINEERING, vol 3(5), pp 701-707, DOI: 10.1016/J.ENG.2017.05.021

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ФРИКЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ТРЕНИИ ЛАТУНИ Л63 С УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОЙ СТРУКТУРОЙ

А.В. Филиппов, к.т.н, ст.преп.¹, н.с.², Н.Н. Шамарин, асс.¹, О.А. Подгорных, зав. лаб.¹

¹*Юргинский технологический институт Томского политехнического университета, 652055, г. Юрга, ул. Ленинградская, 26, тел. (38451)-7-77-61*

²*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, 634055, г. Томск, пр. Академический, 2/4, тел. (3822)-49-18-81*

E-mail: avf@ispms.ru

В работе рассматривается экспериментальное исследование динамики фрикционных процессов при трении объемных ультрамелкозернистых материалов. В качестве модельных образцов использовалась латунь Л63 с крупнокристаллической и ультрамелкозернистой структурой, сформированной методом равноканального углового прессования. В процессе сухого трения скольжения осуществлялась регистрация сигналов виброускорений и акустической эмиссии. Анализ коротких сигналов с применением преобразований Фурье позволил установить характерные параметры сигналов, полученных при трении крупнокристаллических и ультрамелкозернистых материалов.

Наиболее распространенными технологическими операциями формообразования ответственных и прецизионных изделий в машиностроении являются резание, выглаживание, шлифование и т.д. Все эти процессы сопровождаются интенсивным трением скольжения между инструментом и обрабатываемым изделием. Высокое удельное давление в процессах формообразования приводит к тому, что на контактных площадках трение осуществляется в условиях частичного или даже полного отсутствия смазки, т.е. в режиме сухого адгезионного трения скольжения [1–3]. Объемные материалы с ультрамелкозернистой (УМЗ) структурой являются перспективными с точки зрения их применения при производстве ответственных элементов авиационной и ракетнокосмической техники, прецизионных элементов измерительных приборов, а также мелкоразмерных элементов в робототехнике. Применение УМЗ материалов в указанных отраслях промышленности обусловлено их более высокими показателями по механической прочности, а также точности и качеству механической обработки, по сравнению с крупнокристаллическими материалами [4,5]. Механические колебания трибологической системы связаны с изменением динамики фрикционных процессов и оказывают существенное влияние на механику процесса трения, что выражается в изменении деформационного поведения исследуемых

материалов и сказывается на интенсивности их изнашивания [6]. Для экспериментального исследования динамики процессов трения применяют методы акусто- и вибродиагностики [7–18].

В связи с выше сказанным целью данной работы является исследование динамического поведения материалов с ультрамелкозернистой структурой в условиях сухого трения скольжения.

Для проведения исследований использовалась экспериментальная установка, представленная на рисунке 1. Трение скольжения осуществлялось по схеме палец-диск на трибометре Tribotechnic. Изменение динамики фрикционных процессов оценивалось с применением лазерного Доплеровского виброметра PSV-500-3D-NV и комплекса АЭ диагностики ЭЯ-2. Испытания проводились на образцах крупнокристаллической и ультрамелкозернистой латуни Л63. УМЗ образцы получены методом равноканального углового прессования (РКУП). Число проходов при РКУП составляло от 1 до 3. Число проходов эквивалентно степени деформации материала.

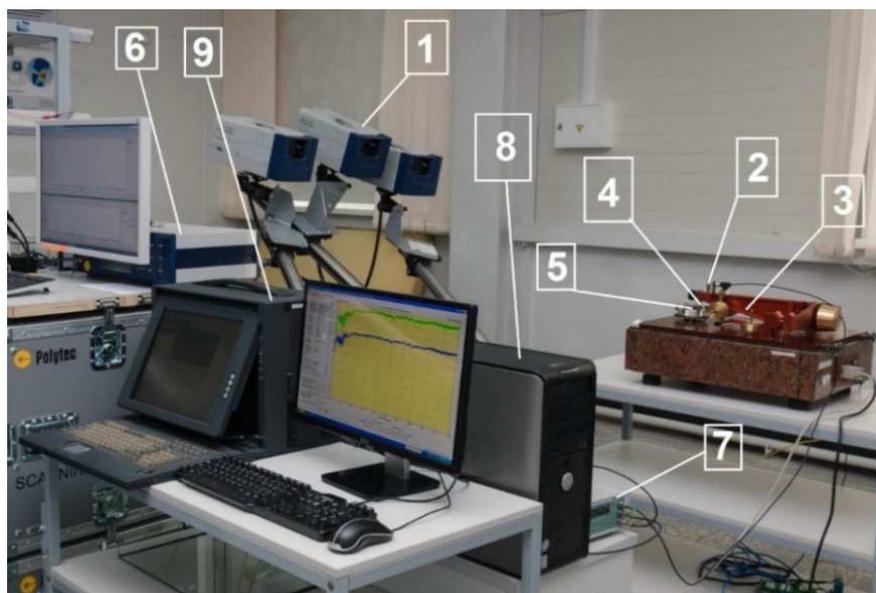


Рис. 1. Экспериментальная установка: 1 – лазерный доплеровский виброметр, 2 – датчик АЭ, 3 – трибометр, 4 – образец, 5 – контроллер, 6 – система обработки данных виброметра, 7 – усилитель АЭ, 8 – система обработки данных трибометра, 9 – система обработки данных АЭ.

На рисунке 2 приведен график иллюстрирующий влияние степени деформации материала и нормальной нагрузки на набегающую величину среднеквадратичного значения амплитуды виброускорений. Увеличению степени деформации отражает степень измельчения структуры материала. Таким образом получается, что при уменьшении размерности структуры материала приводит к повышению амплитуды вибраций в трибологической системе.

Поскольку фрикционные процессы протекают на контактных площадках на коротком интервале времени, постольку более детальный анализ динамики трения лучше проводить выделив характерные короткие сигналы [19–22]. Так при трении неупрочненного материала с крупнокристаллической структурой амплитуда виброускорений состоит из периодических небольших всплесков с плавными периодами нарастания и затухания (рисунок 3а). В результате анализа изменения амплитуды методом быстрого Фурье преобразования (Short Time Fourier Transform – STFT) мы наблюдаем следующую картину (рисунок 3б). Во-первых, диапазон изменения амплитуды по времени для выделенных частот лежит в пределах от -135,5 до 10,5 Дб. Во-вторых, всплески амплитуды виброускорений находят в области невысоких частот от 600 до 2400 Гц. Отмеченные особенности указывают на монотонность процесса трения в условиях испытания неупрочненного материала с крупнокристаллической структурой.

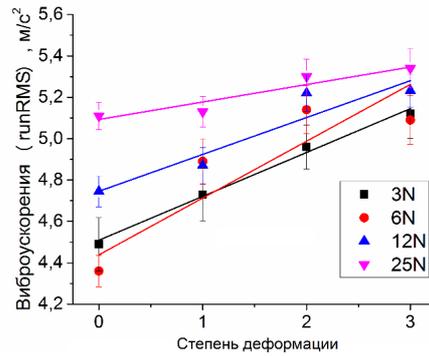


Рис. 2. Влияние степени деформации материала на среднее значение амплитуды виброускорений

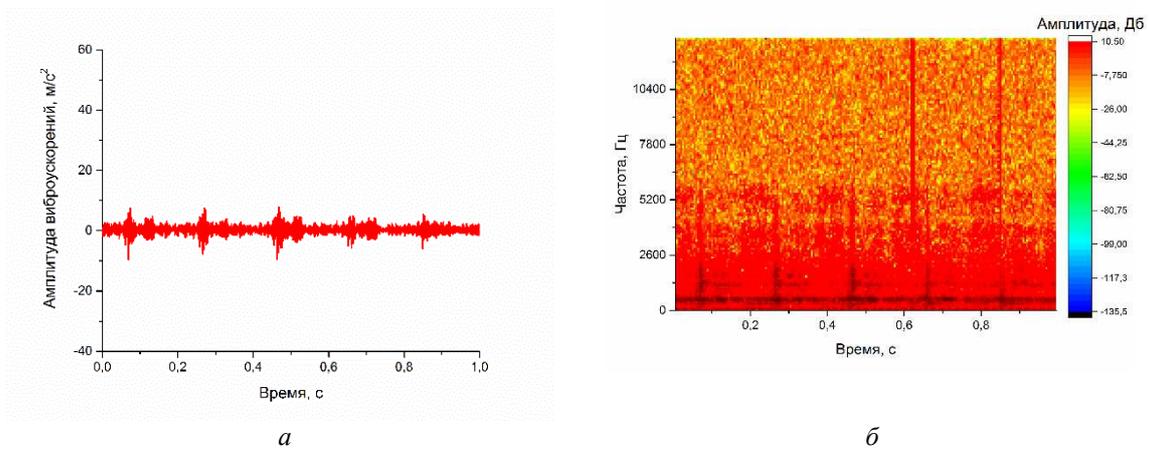


Рис. 3. Изменение амплитуды виброускорений (а) и STFT картина распределения частот колебаний (б) во времени при трении неупрочненного материала

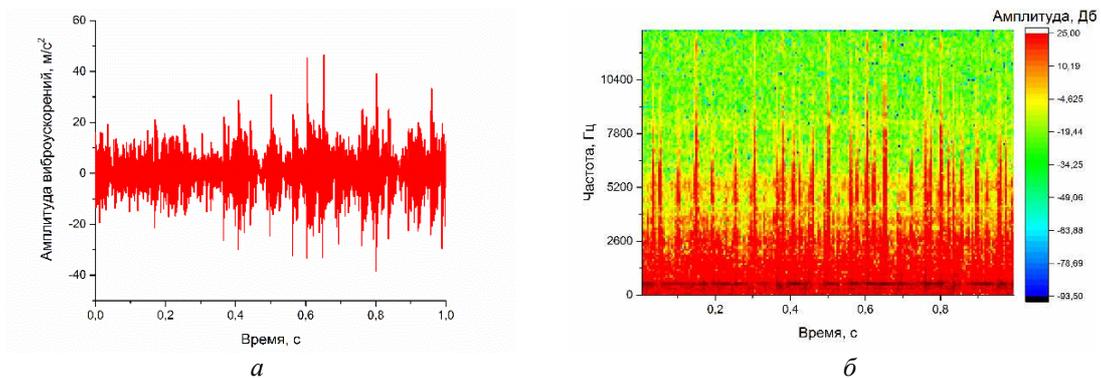


Рис. 4. Изменение амплитуды виброускорений (а) и STFT картина распределения частот колебаний (б) во времени при трении деформационно-упрочненного материала

При трении деформационно-упрочненного материала с УМЗ структурой количество всплесков амплитуды виброускорений резко увеличилось (рисунок 4а). Увеличение максимальной амплитуды виброускорений сопровождается сокращением периода её нарастания и затухания. STFT анализ (рисунок 4б) указывает на перераспределение энергии амплитуды сигнала, которая в рассматриваемом случае находится в диапазоне от -93,5 до 25 Дб. При этом диапазон частот и энергии амплитуды указывают на более неравномерное распределение амплитудно-частотных характеристик сигнала во времени, по сравнению с неупрочненным материалом. Такое поведение амплитуды сигнала виброускорений при сухом трении скольжения УМЗ материала указывает на увеличение колебаний в три-

биологической системе, вызванное повышенной механической прочностью и особенностями изнашивания приповерхностного слоя образцов с образованием микротрещин и частиц износа.

При трении исходного образца и образца после однопроходной обработки РКУП типичные фреймы АЭ содержат несколько всплесков амплитуды сигнала, которые почти полностью лишены периода нарастания и затухания (рисунок 5а). Тогда как типичные фреймы, полученные при трении двух- и трехпроходных образцов, содержат всплески амплитуды со значительным периодом нарастания и затухания (~3 ms) (рисунок 6а). После STFT обработки этих фреймов получено изменение во времени медианной частоты (рисунки 5б и 6б). При трении исходного образца и после однопроходной обработки РКУП во временной области всплесков амплитуды сигнала АЭ наблюдаются всплески величины медианной частоты (рисунок 5а). При трении образцов после двух- и трехпроходной обработки РКУП периодам всплесков с нарастанием и затуханием амплитуды АЭ соответствуют периоды значительного падения медианной частоты (рисунок 6б).

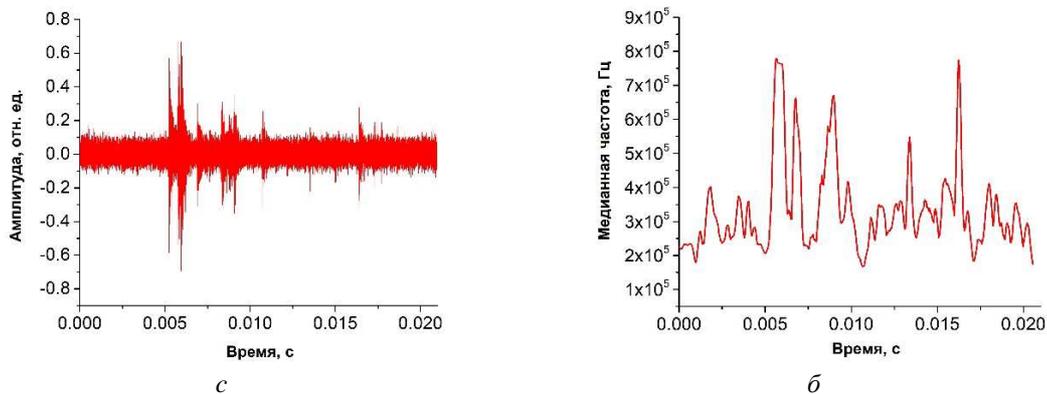


Рис. 5. Изменение амплитуды (а) и медианной частоты (б) акустической эмиссии при трении неупрочненного материала

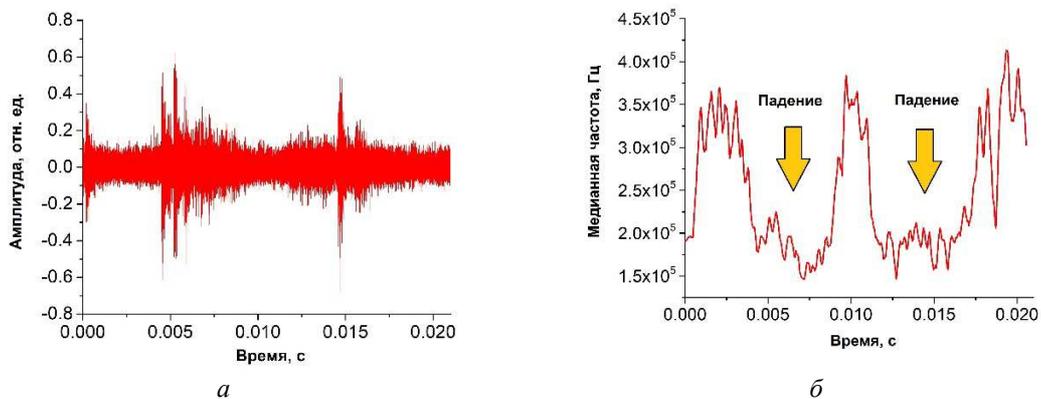


Рис. 6. Изменение амплитуды (а) и медианной частоты (б) акустической эмиссии при трении деформационно-упрочненного материала

Локальное падение медианной частоты объясняется изменением характера формирования и разрушения приповерхностного слоя материала, что подтверждается при проведении структурных исследований (рисунок 7). Как и в ранее выполненной работе [8] локальное падение медианной частоты соотносится с более интенсивным развитием деформационных процессов в приповерхностном слое и его разрушением с образованием множества трещин (рисунок 7б).

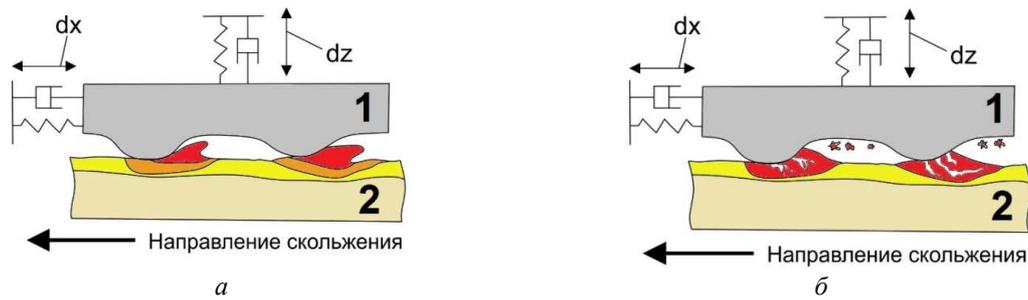


Рис. 7. Схематичное представление распространения поля деформации в неупрочненном (а) и деформационно-упрочненном материалах (б): 1 – контртело (шарик), 2 – образец, dx – смещение в горизонтальной плоскости, dz – смещение в вертикальной плоскости

В результате выполненных экспериментальных исследований установлено, что при сухом трении скольжения материала с ультрамелкозернистой структурой амплитуда вибраций трибологической системы выше, чем при трении материала с крупнокристаллической структурой. Установлены отличительные особенности в изменении амплитуды сигнала АЭ и его медианной частоты, выражающиеся в локальном падении медианной частоты АЭ в области всплеска амплитуды АЭ при трении деформационно-упрочненного материала. Такое поведение амплитуды сигнала и его частоты характерно для условий хрупкого разрушения приповерхностного слоя образца.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-38-00058.

Список литературы

1. Bahi S, Nouari M, Moufki A, El Mansori M, Molinari A. A new friction law for sticking and sliding contacts in machining. *Tribol Int* 2011;44:764–71. doi:10.1016/j.triboint.2011.01.007.
2. Halila F, Czarnota C, Nouari M. A new abrasive wear law for the sticking and sliding contacts when machining metallic alloys. *Wear* 2014;315:125–35. doi:10.1016/j.wear.2014.03.013.
3. Atlati S, Moufki A, Nouari M, Haddag B. Interaction between the local tribological conditions at the tool-chip interface and the thermomechanical process in the primary shear zone when dry machining the aluminum alloy AA2024-T351. *Tribol Int* 2017;105:326–33. doi:10.1016/j.triboint.2016.10.006.
4. Xu J, Li J, Shan D, Guo B. Microstructural evolution and micro/meso-deformation behavior in pure copper processed by equal-channel angular pressing. *Mater Sci Eng A* 2016;664:114–25. doi:10.1016/j.msea.2016.03.016.
5. Valiev RZ, Kozlov E V., Ivanov YF, Lian J, Nazarov AA, Baudelet B. Deformation behaviour of ultra-fine-grained copper. *Acta Metall Mater* 1994;42:2467–75. doi:10.1016/0956-7151(94)90326-3.
6. Munoa J, Beudaert X, Dombovari Z, Altintas Y, Budak E, Brecher C, et al. Chatter suppression techniques in metal cutting. *CIRP Ann - Manuf Technol* 2016;65:785–808. doi:10.1016/j.cirp.2016.06.004.
7. Câmara MA, Abrão AM, Rubio JCC, Godoy GCD, Cordeiro BS. Determination of the Critical Undeformed Chip Thickness in Micromilling By Means of the Acoustic Emission Signal. *Precis Eng* 2016. doi:10.1016/j.precisioneng.2016.06.007.
8. Huang PL, Li JF, Sun J, Jia XM. Cutting signals analysis in milling titanium alloy thin-part components and non-thin-wall components. *Int J Adv Manuf Technol* 2016;84:2461–9. doi:10.1007/s00170-015-7837-0.
9. Bhuiyan MSH, Choudhury IA, Dahari M, Nukman Y, Dawal SZ. Application of acoustic emission sensor to investigate the frequency of tool wear and plastic deformation in tool condition monitoring. *Measurement* 2016;92:208–17. doi:10.1016/j.measurement.2016.06.006.
10. Skrickij V, Bogdevicius M, Junevicius R. Diagnostic features for the condition monitoring of hypoid gear utilizing the wavelet transform. *Appl Acoust* 2016;106:51–62. doi:10.1016/j.apacoust.2015.12.018.
11. Papacharalampopoulos A, Stavropoulos P, Doukas C, Foteinopoulos P, Chryssolouris G. Acoustic emission signal through turning tools: A computational study. *Procedia CIRP* 2013;8:426–31. doi:10.1016/j.procir.2013.06.128.
12. Bhuiyan M, Choudhury S, Nukman Y. Tool condition monitoring using acoustic emission and vibration signature in turning. *Proc World ...* 2012;III:2–6.

13. Bhuiyan MSH, Choudhury IA, Nukman Y. An innovative approach to monitor the chip formation effect on tool state using acoustic emission in turning. *Int J Mach Tools Manuf* 2012;58:19–28. doi:10.1016/j.ijmachtools.2012.02.001.
14. Loutas TH, Roulias D, Pauly E, Kostopoulos V. The combined use of vibration, acoustic emission and oil debris on-line monitoring towards a more effective condition monitoring of rotating machinery. *Mech Syst Signal Process* 2011;25:1339–52. doi:10.1016/j.ymsp.2010.11.007.
15. Liu X, Wu X, Liu C. A comparison of acoustic emission and vibration on bearing fault detection. 2011 *Int Conf Transp Mech Electr Eng* 2011:922–6. doi:10.1109/TMEE.2011.6199353.
16. Elforjani M, Mba D. Accelerated natural fault diagnosis in slow speed bearings with Acoustic Emission. *Eng Fract Mech* 2010;77:112–27. doi:10.1016/j.engfracmech.2009.09.016.
17. Vervloet D, Nijenhuis J, van Ommen JR. Monitoring a lab-scale fluidized bed dryer: A comparison between pressure transducers, passive acoustic emissions and vibration measurements. *Powder Technol* 2010;197:36–48. doi:10.1016/j.powtec.2009.08.015.
18. Loutas TH, Sotiriades G, Kalaitzoglou I, Kostopoulos V. Condition monitoring of a single-stage gearbox with artificially induced gear cracks utilizing on-line vibration and acoustic emission measurements. *Appl Acoust* 2009;70:1148–59. doi:10.1016/j.apacoust.2009.04.007.
19. Filippov AV, Tarasov SY, Fortuna SV, Podgornykh OA, Shamarin NN, Rubtsov VE. Microstructural, mechanical and acoustic emission-assisted wear characterization of equal channel angular pressed (ECAP) low stacking fault energy brass. *Tribol Int* 2018;123:273–85. doi:10.1016/j.triboint.2018.03.023.
20. Lychagin DV, Filippov AV, Kolubaev EA, Novitskaia OS, Chumlyakov YI, Kolubaev AV. Dry sliding of Hadfield steel single crystal oriented to deformation by slip and twinning: Deformation, wear, and acoustic emission characterization. *Tribol Int* 2018;119:1–18. doi:10.1016/j.triboint.2017.10.027.
21. Filippov AV, Rubtsov VE, Tarasov SY, Podgornykh OA, Shamarin NN. Detecting transition to chatter mode in peakless tool turning by monitoring vibration and acoustic emission signals. *Int J Adv Manuf Technol* 2018;95:157–69. doi:10.1007/s00170-017-1188-y.
22. Filippov AV, Rubtsov VE, Tarasov SY. Acoustic emission study of surface deterioration in tribocontacting. *Appl Acoust* 2017;117:106–12. doi:10.1016/j.apacoust.2016.11.007.

ОСНОВНЫЕ СПОСОБЫ РАЗЛИВКИ ФЕРРОСПЛАВОВ

*Е.Н. Несибек студ. группы 10В41,
научный руководитель: О.И. Нохрина профессор
Юргинский технологический институт (филиал)
Томского политехнического университета
652050, Кемеровская обл., г. Юрга, ул. Ленинградская 26.
e-mail:ekosh170396@mail.ru*

Разливка металла в современном производстве ферросплавов производится несколькими наиболее распространенными методами:

- разливка в изложницы;
- разливка на разливочных машинах;
- полигонная разливка.

Разливка ферросплавов в изложницы – один из наиболее ранних способов разливки, однако до сих пор применяется для разливки кремнистых и хромистых ферросплавов. Существует две разновидности разливки в изложницы:

1. Разливка в водонеохлаждаемые чугунные изложницы (поддоны). Применяется для разливки кремнистых (ферросилиций, кремний кристаллический) и хромистых (низкоуглеродистый феррохром) сплавов.

Изложницы должны быть установлены горизонтально для обеспечения их равномерного заполнения. Для сокращения потерь металла изложницы устанавливают вплотную друг к другу. Углы изложниц, а также разрушенные места бортов подсыпают порошком выплаваемого сплава. Для предотвращения изложницы от размывания на место падения струи кладут кусок сплава того же состава, что и выплаваемый металл. Кремнистые сплавы разливают в стационарные чугунные изложницы с толщиной слитка до 100 мм, хромистые – до 60 мм. Большая толщина слитков металла способствует развитию ликвации и получению неоднородного слитка. Для хромистых сплавов с большой толщиной слитка существенно возрастают трудности по их дроблению.