

*А.Н. Савельев, С.В. Полищук, А.Ю. Поданев*

Сибирский государственный индустриальный университет

## ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ТРИБОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ НА МЕДИ

В металлургической промышленности существует целый ряд устройств, к которым предъявляются требования высокой теплопроводности. В качестве материала таких устройств широко используется медь или сплавы на медной основе. Одним из таких устройств в металлургическом оборудовании является кристаллизатор машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ). Наиболее частыми причинами выхода из строя кристаллизатора является износ рабочих поверхностей медных облицовок. При литье стали на МНЛЗ происходит скольжение формирующейся корочки слитка по поверхности медных рабочих стенок кристаллизатора. В результате такого трения происходит довольно интенсивное абразивное изнашивание этих стенок из-за сравнительно небольшой микротвердости меди ( $80 \text{ Н/мм}^2$ ).

В настоящее время существует множество способов повышения работоспособности кристаллизаторов [1], однако все они по тем или иным причинам широкого применения не нашли, и поиск подходов, позволяющих обеспечить высокую работоспособность медных изделий, продолжается. Одним из возможных способов получения модифицированных материалов является трибометаллургическая технология на основе эффекта циркуляционного трения [1, 2]. Известно, что любой вид трения является синергетическим процессом, в результате которого образуется вторичная структура или «третье тело» [2] (промежуточная зона), которое располо-

жено между взаимодействующими поверхностями. Вид образовавшегося в зоне трения такого тела определяется, прежде всего, энергетическими условиями контактируемых поверхностей.

В рамках энергетических координат циркуляционное трение расположено между зонами микрорезания (внутреннего трения) и фрикционного резания [3]. Суть этого эффекта состоит в том, что при определенных энергетических условиях одна из поверхностей трения начинает интенсивно деформироваться, формируя таким образом аморфный слой значительной толщины. Процесс деформирования носит ярко выраженный циркуляционный характер, в результате которого структура металла сильно измельчается [4]. Проработка слоя происходит настолько интенсивно, что в результате циркуляций кристаллическая структура металла теряется, возникает аморфная структура толщиной до 2 – 3 мм (рис. 1). При этом у слоя сдеформированного металла возникает целый набор совершенно уникальных свойств, свидетельствующих о том, что сформировалась новая структура участвующего в процессе трения материала [5].

Для реализации трибометаллургических технологий на меди необходимо знать режимы действия инструмента на металл, при которых возникает эффект циркуляционного трения [6]. Циркуляционное трение возникает в результате определенным образом организованного контакта материала с инструментом, рабочая поверхность которого движется со скоростью



*Темнотравящийся слой*

*Мелкозернистая  
структура*

*Деформированные зерна*

*Основная структура*

Рис. 1. Структура,  $\times 100$ , поверхностного слоя меди после трибометаллургической обработки

Матрица планирования эксперимента

Величина заглабления диска, мм	Номер опытов при скорости подачи стола, мм/с			
	2,04	3,83	4,96	7,85
0,025	1	16	18	3
	15	29	30	13
0,050	22	2	26	12
	14	23	17	32
0,075	8	27	9	28
	24	31	6	5
0,100	10	11	19	25
	21	4	7	20

105 м/с [7]. Во время воздействия на материал происходит сильный, локализованный в зоне контакта разогрев и последующая его интенсивная объемная деформация по циркуляционным траекториям. Зоне циркуляционного трения предшествует зона внутреннего трения. В этой зоне на одной из поверхностей металла начинают образовываться задиры, которые к моменту перехода от зоны внутреннего трения к зоне циркуляционного трения создают интенсивно сформированный объемный слой металла [8]. При переходе через зону циркуляционного трения металл начинает выдавливаться из зоны трения и процесс начинает реализовывать механизм фрикционного резания [9]. В самой зоне циркуляционного трения интенсивная механическая деформация разрушает кристаллическую структуру материала, делая ее аморфной, а циркуляционные течения равномерно ее перемешивают, перенося поверхностные слои материала в подповерхностные и обратно. Одновременно циркуляционные потоки могут переносить подаваемую в зону деформации добавку, распределяя ее по всему деформированному слою и реализуя таким образом разнообразные трибometаллургические технологии [10].

Наиболее достоверным способом нахождения режимов организации трибometаллургического процесса на сегодняшний день является эксперимент. Опыты по определению параметров трения проводили на лабораторной установке [4]. Экспериментальная установка представляет собой консольно-фрезерный станок 6Н81, на станине которого установлен электродвигатель мощностью 11 кВт и числом оборотов 2900 об/мин. На вал электродвигателя помещен диск толщиной рабочей поверхности 20 мм. Диаметр диска 690 мм, что обеспечивает необходимую технологическую скорость движения рабочей поверхности инструмента. Образец из меди закрепляется на рабочем столе станка и подается в технологическую зону с различной скоростью.

Величина скорости подачи фиксированная и выбирается включением скорости коробки подач. Значение заглабления диска в образец устанавливается механизмом подъема стола до начала трибometаллургического процесса.

При проведении эксперимента варьировали два фактора: скорость подачи стола и величину заглабления диска. Диапазон изменения варьируемых величин и последовательность проведения опытов приведены в таблице.

В качестве параметров процесса взаимодействия меди с инструментом в настоящей работе использовали толщину прорабатываемого слоя и мощность, затрачиваемую на реализацию процесса. Потребляемую мощность трибometаллургического процесса фиксировали с помощью ваттметра, подключенного к электродвигателю типа Д539. Для замера толщины аморфного слоя, получаемого на меди в каждом опыте эксперимента, были изготовлены медные шлифы. По геометрическим параметрам пятна контакта инструмента с образцом определяли площадь пятна контакта. Далее находили удельную мощность взаимодействия инструмента с медным образцом.

После травления и исследования шлифов был проведен металлографический анализ образцов, в результате которого были выявлены структурные изменения в подповерхностной области. По структуре металла, получаемой при травлении шлифов, определяли степень проработки поверхностного слоя и его толщину.

Характер изменений толщины аморфного слоя и удельной мощности взаимодействия инструмента с медью показаны на рис. 2 и 3.

На графике изменения толщины аморфного слоя выделяется максимальное значение, получаемое при скорости подачи  $v = 4,96$  мм/с и величине заглабления инструмента в обрабатываемый металл  $t = 0,05$  мм, что соответствует  $h = 0,7$  мм. При этом удельная мощность трения в исследуемом диапазоне скоростей подачи материала в

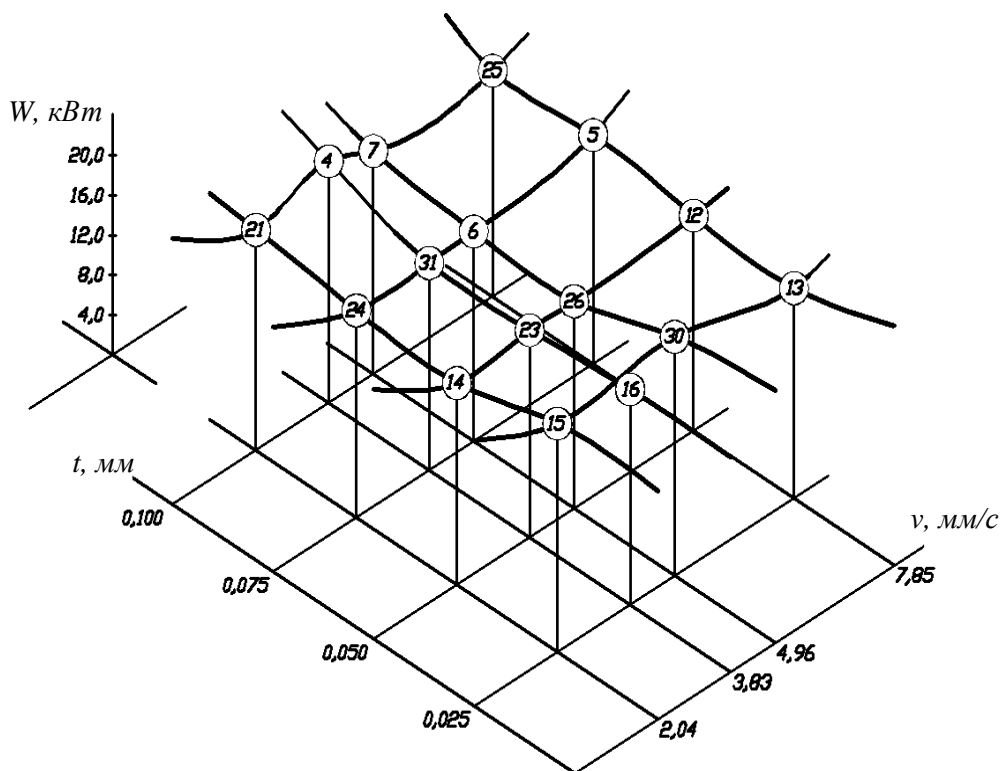


Рис. 2. Диаграмма распределения толщины аморфного слоя, полученного трибометаллургическим способом, в зависимости от разных режимов обработки. Здесь и на рис. 3 цифры в кружках – номера опытов

технологическую зону и заглупления инструмента минимальна и соответствует  $W = 88,4 \text{ Вт/мм}^2$ .

**Выводы.** Результаты работы показывают, что способ циркуляционного трения возможен: это подтверждено выполненным экспериментом. В результате исследований были выявлены структурные изменения в подповерхностной области, определена толщина получаемого слоя. По ито-

гам эксперимента проведена оценка параметров, при которых достигается механизм циркуляционного трения, а именно: максимальное изменение толщины слоя происходит при скорости подачи стола  $v = 4,96 \text{ мм/с}$ , величине заглупления диска  $t = 0,05 \text{ мм}$ , толщина образовавшегося слоя равна  $h = 0,7 \text{ мм}$ .

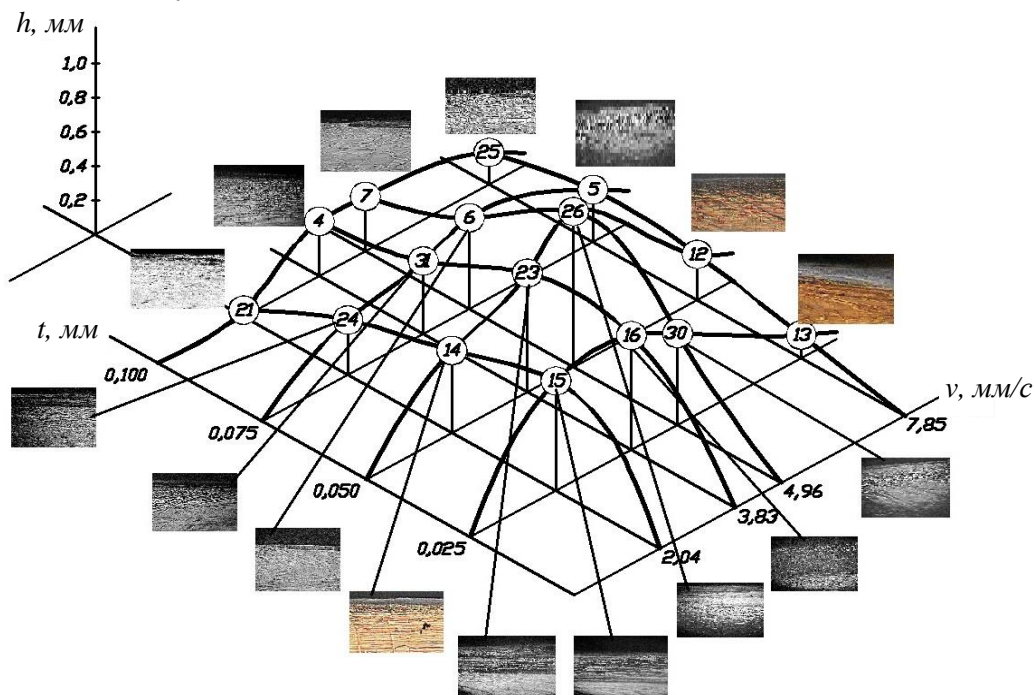


Рис. 3. Диаграмма распределения удельной мощности в зависимости от скорости вращения и величины заглупления диска

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Локтева Н.А., Савельев А.Н. О характеристиках колебательного процесса в зоне взаимодействия инструмента с материалом при циркуляционном трении // Изв. вуз. Черная металлургия. 2008. № 8. С. 48 – 52.
2. Савельев А.Н. Особенности механизма циркуляционного трения твердых тел // Изв. вуз. Черная металлургия. 1991. № 4. С. 101 – 103.
3. Костецкий Б.И. О контактных взаимодействиях при трении и резании материалов // Надежность и долговечность машин и сооружений. 1982. № 1. С. 72 – 81.
4. Логунов И.И., Люленков В.И., Чалков В.С. Установка для упрочнения деталей высокоскоростным трением // Изв. вуз. Черная металлургия. 1985. № 2. С. 131 – 134.
5. Поверхностная прочность материалов при трении / Б.И. Костецкий, И.Г. Носовский, А.К. Караулов. – Киев: Техника, 1976. – 286 с.
6. Савельев А.Н., Савельева Н.А. – В кн.: Основы технологических процессов получения аморфизированных лент на основе эффекта циркуляционного трения. – Новокузнецк: изд. СибГИУ, 1998. С. 95 – 99.
7. Никитюк Ю.Н., Григоренко Г.М., Зеленин В.И. и др. Технология восстановительного ремонта кристаллизаторов МНЛЗ способом наплавки трением с перемешиванием // Современная электрометаллургия. 2013. № 3. С. 51 – 55.
8. Савельев А.Н. Особенности механизма трения при скоростном взаимодействии гладким диском на металл. – В кн.: Повышение эксплуатационной надежности деталей и технологического инструмента металлургических машин. – М.: Металлургия, 1991. С. 92 – 96.
9. Костецкий Б.И. Трение, смазка и износ в машинах. – Киев: Техника, 1970. – 396 с.
10. Кабалдин Ю.Г. Синергетический подход к процессам трения // Вестник машиностроения. 1996. № 12. С. 22 – 30.

© 2019 г. *А.Н. Савельев, С.В. Полищук,  
А.Ю. Поданев*  
Поступила 31 января 2019 г.