

УДК 621.74

УПРАВЛЕНИЕ ПОВРЕЖДАЕМОСТЬЮ НЕПРЕРЫВНО ЛИТЫХ ЗАГОТОВОК ИЗ МЕДНЫХ СПЛАВОВ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ИХ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ**©Хорошилов О. Н.***Українська інженерно-педагогічна академія***Информация про автора:**

Хорошилов Олег Миколайович: ORCID: 0000-0003-2048-6311; horol@i.ua; доктор технічних наук; професор кафедри металорізючого обладання і транспортних систем; Українська інженерно-педагогічна академія; вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

Рассмотренные направления исследования были реализованы для процесса непрерывного литья на машине горизонтального типа.

Эксперимент проводился на заготовках из бронзы марки Бр. О5Ц5С5 диаметром 30,0 мм. Для каждого технологического параметра изготавливали не менее 8 образцов для построения модели, которая может воспроизвести результат эксперимента с надежностью 95 %.

В результате исследований установлено, что применение реверсивного движения заготовки позволяет на порядок снизить напряжение, возникающие во время преодоления силы трения покоя. Так же определено, что при повышении частоты движения заготовки в кристаллизаторе в интервале $2,5...7,5 \text{ мин}^{-1}$ увеличивается прочность механических свойств медных сплавов с 205 до 215 МПа, при условии реализации реверсивного движения.

Таким образом, увеличение частоты движения заготовки при использовании реверсивного ее движения во время преодоления силы трения покоя позволило повысить прочностные свойства заготовок из медных сплавов в интервале 12,4...15,8 %.

Ключевые слова: повреждаемость; медные сплавы; заготовка; непрерывное литье.

Хорошилов О. М. «Керування пошкоджуваністю безперервно литих заготовок з мідних сплавів з метою підвищення їх механічних властивостей.

Розглянуті напрями дослідження були реалізовані для процесу безперервного лиття на машині горизонтального типу.

Експеримент проводився на заготовках з бронзи марки Бр. О5Ц5С5 діаметром 30,0 мм. Для кожного технологічного параметра виготовляли не менше, як 8 зразків для побудови моделі, яка може відтворити результат експерименту з надійністю 95 %.

В результаті досліджень встановлено, що застосування реверсивного руху заготовки дозволяє на порядок знизити, напругу, що виникає під час подолання сили тертя спокою. Так само визначено, що при підвищенні частоти руху заготовки у кристалізаторі в інтервалі $2,5...7,5 \text{ хв}^{-1}$ збільшується міцність механічних властивостей мідних сплавів з 205 до 215 МПа, за умови реалізації реверсивного руху.

Таким чином, збільшення частоти руху заготовки при використанні реверсивного її руху під час подолання сили тертя спокою дозволило підвищити міцність заготовок з мідних сплавів в інтервалі 12,4...15,8 %.

Ключові слова: пошкоджуваність; мідні сплави; заготовка; безперервне лиття.

Khoroshylov O. "Management damage of the continuous casting billet from copper alloys with the purpose of increase of their mechanical properties".

Directions of research have been implemented for the continuous casting process on a machine of the horizontal type.

The experiment was carried out on billet made of bronze mark Br. O5Ц5C5 diameter of 30.0 mm. For each technology option produced no less than 8 samples to build a model that can reproduce the result of the experiment with reliability of 95 %.

As a result of researches it is established that the application of the reverse motion of the billet is possible to reduce the voltage appearing at the time to overcome the force of static friction. Also determined that the increase in the frequency of movement of the billet in the mold in the range of 2.5...7.5 min⁻¹ was possible to increase the strength of the mechanical properties of copper alloys with 205 to 215 MPa, with reverse motion.

Thus, an increase in the frequency of movement of the billet when using a reverse motion of the billet while overcoming the force of static friction is allowed to increase strength properties of billets of copper alloys in the range of 12.4...15.8 %.

Keywords: damage; copper alloys; billet continuous casting.

1. Введение

Механические свойства непрерывно-литых заготовок из медных сплавов зависят от многих факторов. Мы рассмотрим факторы, влияющие на возникновение напряжений в заготовке при ее циклическом движении в кристаллизаторе.

Движение заготовки при непрерывном литье осуществляется циклически по схеме: «движение – пауза». При такой схеме движения заготовки в кристаллизаторе происходят следующие процессы: процесс поступательного движения заготовки, во время которого происходит преодоление силы трения скольжения; во время паузы происходят процессы адгезионного соединения поверхностей «заготовки–втулка кристаллизатора», а перед началом нового цикла движения происходит процесс преодоления силы трения покоя.

2. Анализ литературных данных и постановка задачи исследований

В последнее десятилетие предприятия машиностроительного комплекса Украины ежегодно повышают потребление медных сплавов на 2,1...2,4 % [1]. Это обуславливает ежегодное повышение производительности машин непрерывного литья. Однако после некоторого критического значения производительности машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) дальнейшее повышение ее производительности приводит к снижению качества заготовок (снижение их механических свойств). Известно, что во время изготовления непрерывно-литых заготовок последовательность технологических операций влияет на их механические свойства [2-4]. В работе [3] показано, что «...снижение шага вытягивания заготовки с 35...40 мм до 10 мм приводит к повышению предела прочности образцов из непрерывно-литых заготовок от 177...328 до 301...382 МПа, а относительное удлинение повышается при этом с 4,1...15,5 до 11,6...37,5 %».

В работе [2] показано, что во время циклического движения в поперечном сечении заготовки возникают напряжения во время преодоления силы трения покоя и силы трения скольжения. Эти напряжения вызывают процесс повреждаемости на затвердевающем (вязком) участке заготовки который при этом деформируется.

В современной механике для описания процессов скрытого повреждения материалов используется концепция о параметре повреждаемости конструкционных материалов [5-7].

3. Постановка задачи исследования

В работе необходимо показать связь величины параметра повреждаемости непрерывно литой заготовки с технологическими параметрами процесса непрерывного литья. Это позволит решить задачу рационального управления повреждаемостью непрерывно-литой заготовки на стадии ее изготовления. Для этого необходимо:

- построить математическую модель типа «технологические параметры – механические свойства», в которой входными переменными являются напряжения, частота движения заготовки и ее диаметр;
- провести анализ полученной модели, целью которого является определение рациональных технологических параметров процесса и геометрических характеристик заготовок, которые будут обеспечивать повышение ее механических свойств.

4. Построение математических моделей «технологические параметры процесса – механические свойства заготовки»

Для определения повреждаемости заготовки привлечен трехузловой элемент тела вращения, поскольку сама заготовка является телом вращения. Значения параметров повреждаемости определяются по расчетной схеме метода конечных элементов. По результатам расчетов получено значение параметров повреждаемости в каждом конечном элементе.

Проведенные расчеты показали, что напряженное состояние в заготовке является одноосным, потому в работе применили известные уравнения Бейли-Нортон и Работнова-Качанова для оценивания повреждаемости заготовки:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\epsilon} &= B \cdot \sigma^n / (1 - \omega)^m, \\ \dot{\omega} &= D \cdot \sigma^n / (1 - \omega)^m \quad \omega(0) = 0 \quad \omega(t_*) = 1, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $\dot{\epsilon}$ – скорость деформации ползучести; $\dot{\omega}$ – скорость повреждаемости; σ – напряжение, МПа; ω_0 – значение параметра повреждаемости в начальный момент времени $t=0$; $\omega(t_*)=1$ – значение параметра повреждаемости в момент окончания скрытого разрушения; B, D, n, m – коэффициенты, которые определяли по экспериментальным данным о ползучести и разрушении заготовки.

Примером получения отливок методом непрерывного литья есть заготовка диаметром 0,029...0,14 м. Данная заготовка изготавливается из бронзы марки Бр О5Ц5С5 ГОСТ 613-79.

Особое внимание в процессе исследований обращалось на механические свойства заготовок, полученных при изменении частоты их движения, диаметра и применения отрицательного напряжения в заготовках во время преодоления силы трения покоя.

Для определения адекватности математической модели была проведена математическая обработка экспериментальных данных влияния частоты продвижения заготовки в кристаллизаторе, ее диаметра и напряжения, возникающего во время преодоления силы трения покоя (СТП) и скольжения (СТС), на границу прочности образцов заготовки при растяжении с помощью программы Matlab R2012b. Для этого были выбраны данные относительно границы прочности при растяжении бронзы марки Бр. О5Ц5С5 при значении трех переменных факторов: это x_1 – совместное значение напряжений, которые возникают в заготовке при преодолении СТП и СТС в интервалах – 0,21...-0,15 МПа, 0,21...0,15 МПа и 0,15...0,1 МПа, x_2 – частота продвижения заготовки в кристаллизаторе в интервале 2,5...7,5 мин⁻¹ и x_3 – диаметр непрерывно-литой заготовки от 0,029 до 0,14 м. Общая математическая модель имеет вид:

$$\bar{y} = 251,31 - 1,13x_1 + 0,97x_2 - 1408,65x_3 - 0,52x_1^2 - 0,06x_2^2 + 9630,60x_3^2 - 0,84x_1x_2 + 2,17x_1x_3 - 1,14x_2x_3 + 1,20x_1x_2x_3 \quad (2)$$

На основе уравнения (2) для плоскости $x_3 = 0,029$ м имеем трехмерную поверхность, которая представлена на рис.2, и имеет следующий вид:

$$\bar{y} = 218,55 + 1,13x_1 + 0,97x_2 - 0,06x_2^2 - 0,84x_1x_2 + 2,17x_1x_3 - 0,033x_2 + 0,035x_1x_2 \quad (3)$$

Создана математическая модель зависимости прочности заготовки от трех факторов x_1 – частоты продвижения заготовки, x_2 – напряжения преодоления силы трения покоя и x_3 – диаметра заготовки. Математическая модель позволила получить зависимости между прочностью бронзы марки Бр. О5Ц5С5 и напряжением преодоления силы трения покоя, частотой продвижения заготовки и ее диаметром.

5. Результаты исследований и их интерпретация

С помощью математической модели были построены две трехмерные модели, представленные на рис. 1 и рис. 2.

На рис. 1 представлено влияние напряжения в заготовке во время преодоления силы трения покоя и частоты движения заготовки на прочностные свойства заготовки. При этом диаметр заготовки имел постоянную величину $d=0,09$ м. На рис. 2 представлена модель влияния на прочность заготовки диаметра заготовки и частоты ее движения в кристаллизаторе для постоянного значения напряжения в заготовке во время преодоления силы трения покоя, равного -0,21 МПа.

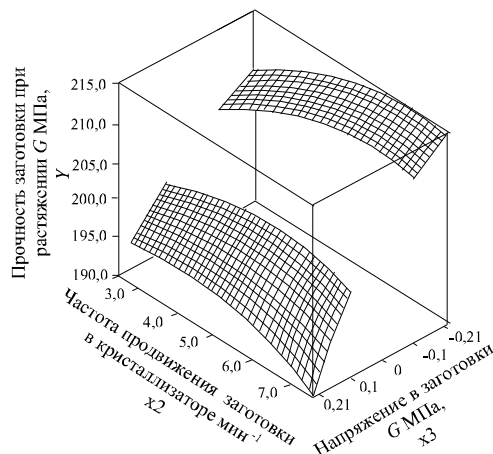


Рис. 1 – Модель влияния напряжения и частоты движения заготовки на ее прочность при постоянном значении диаметра $d = 0,09$ м

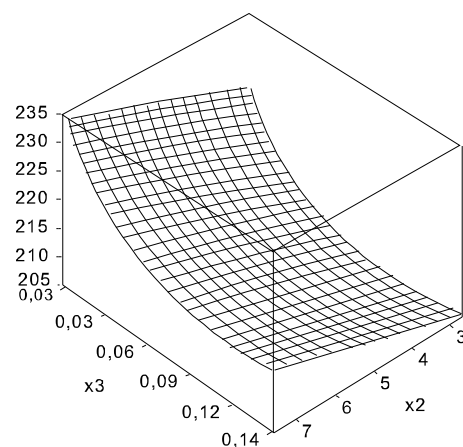


Рис. 2 – Модель влияния диаметра и частоты движения заготовки на ее прочность при напряжении $\sigma = -0,21 = \text{const}$

Установлено, что замена поступательного движения заготовки на реверсивное во время преодоления силы трения покоя совместно с увеличением частоты движения заготовки от $2,5 \text{ мин}^{-1}$ до $7,5 \text{ мин}^{-1}$ позволяет повысить механические свойства медных сплавов с 190 до 235 МПа.

Выводы

Таким образом, в работе показано влияние технологических параметров процесса непрерывного литья (частота движения заготовки в кристаллизаторе, напряжение в поперечном сечении заготовки во время преодоления силы трения покоя и диаметр заготовки) на параметр повреждаемости заготовки. Вследствие этого механические свойства заготовок выросли на 20,0...23,7 %.

Список использованных источников:

1. Яновский А. О стабилизации и перспективах развития литейного производства Украины на современном этапе рыночной экономики / А. О. Яновский // Литейное производство. – 2005. – № 2. – С. 31–35.
2. Хорошилов О. Н. Процесс горизонтального непрерывного литья медных сплавов с вынужденным кратковременным реверсивным движением заготовок повышенного качества в неподвижном кристаллизаторе: автореф. дис. ... доктора техн. наук. 05.16.04. / О. Н. Хорошилов ; Нац. Металлург. акад. Украины (НМетАУ). – Днепропетровск, 2013. – 32 с.
3. Наумик В. В. Разработка оптимального режима прерывистой вытяжки при получении качественных цельнолитых заготовок из оловянной бронзы / В. В. Наумик // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2010. – № 1. – С. 99 – 103.
4. Хрычиков В. Е. Литейное производство черных и цветных металлов: учеб. пособие / В. Е. Хрычиков, Е. В. Меньяйло. – Дніпропетровськ: НМетАУ, 2010. – 89 с.
5. Бреславский Д. В. Уравнения состояния циклической ползучести бронзовых сплавов / Д. В. Бреславский, О. А. Татаринова, О. Н. Хорошилов // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харьков, 2007. – Вип. 38. – С. 36-41.
6. Бреславский Д. В. Управление качеством непрерывно-литых заготовок [Электронный ресурс] / Д. В. Бреславский О. Н. Хорошилов О. И. Пономаренко // Вісник Донбаської держ. машинобуд. акад. : зб. наук. пр. – Краматорськ, 2010. – № 3 (20). – С. 41–46. – Режим доступу до журн.: <http://www.dgma.donetsk.ua/publish/vesnik/>.
7. Методика оценки повреждаемости заготовок в процессах непрерывного литья / Д. В. Бреславский, Ю. Н. Корытко, О. А. Татаринова О. Н. Хорошилов // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-25 : сб. трудов XXV Междунар. науч. конф. (Волгоград, 29 – 31 трав. 2012 р.): в 10 т. / под общ. ред. А.А. Большакова / Волгогр. гос. техн. ун-т. – Волгоград, 2012. – Т. 8, Секция 12. – С. 174–175.

References

1. Yanovskiy, A 2005, 'O stabilizatsii i perspektivakh razvitiya liteynogo proizvodstva Ukrainy na sovremennom etape rynochnoy ekonomiki', *Liteynoe proizvodstvo*, no. 2, pp. 31-35.
2. Khorochylov, O 2013, 'Protsess gorizontalnogo nepreryvnogo litya mednykh splavov s vynuzhdennym kratkovremennym reversivnym dvizheniem zagotovok povyshennogo kachestva v nepodvizhnom kristallizatore', Doct.tekh.n. abstract, Natsionalna Metalurhiina akademiia Ukrainy (NMetAU), Dnepropetrovsk.
3. Naumik, V 2010, 'Razrabotka optimalnogo rezhima preryvistoy vtyazhki pri poluchenii kachestvennykh tselnolitykh zagotovok iz olovyannoy bronzy', *Novi materialy i tekhnologii v metalurhii ta mashynobuduvanni*, no. 1, pp.99-103.
4. Khrychikov, V & Menyaylo, E 2010, *Liteynoe proizvodstvo chernykh i tsvetnykh metallov*, NMetAU, Dnipropetrovsk.
5. Breslavskiy, D, Tatarinova, O & Khoroshilov, O 2007, 'Uravneniya sostoyaniya tsiklicheskoj polzuchesti bronzovykh splavov', *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu "KhPI"*, no. 38, pp. 36-41.
6. Breslavskiy, D, Khorochylov, O & Ponomarenko, O 2010, 'Upravlenie kachestvom nepreryvno-litykh zagotovok', *Visnyk Donbaskoi derzhavnoi mashynobudivnoi akademii*, no. 3(20), pp. 41-46, viewed 2014, <<http://www.dgma.donetsk.ua/publish/vesnik>>.
7. Breslavskiy, D, Korytko, Yu, Tatarinova, O & Khorochylov, O 2012, 'Metodika otsenki povrezhdaemosti zagotovok v protsessakh nepreryvnogo litya', *Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiyakh – MMTT-25 Sb. trudov XXV Mezhdunar. nauch. konf., Volgograd, 29 – 31 maya 2012 g.*, Volgogradskiy gosudarstvennyy tekhnicheskyy universitet, Volgograd vol. 8, Sektsiya 12, pp. 174-175.

Стаття надійшла до редакції 11 листопада 2014 р.