

¹О. Н. Хорошилов, д-р техн. наук¹А. А. Павлова, канд. техн. наук¹Украинская инженерно-педагогическая академия, Харьков, Украина
e-mail: horol@i.ua

ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ

Ключові слова: забезпечення якості, технологічний процес безперервного лиття, пошкоджуваність.

Анотація. Розглянуто технологічний процес безперервного лиття заготовок. Виявлено залежності пошкоджуваності заготовки від тривалості циклу і характеру руху під час подолання сил тертя спокою. Наведені технологічні параметри процесу безперервного лиття, регулювання яких дозволяє значно збільшити якість заготовки.

Введение

На сегодняшний день около 50 % заготовок для машиностроительной отрасли получают литьем. Способ непрерывного литья все больше распространяется в мировой промышленности, а использование машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) увеличивает выход годной продукции на 10-15 %, снижает ее себестоимость, улучшаются условия труда, повышается его производительность. Эффект дает сокращение затрат на хозяйство, связанное с разливкой металлов в изложницы, обжимной стан, а в ряде случаев и непрерывный стан, машины центробежного литья, применяемые для производства полых заготовок. Важным преимуществом непрерывной разливки является существенная экономия топливно-энергетических ресурсов и снижение эксплуатационных расходов. В странах ЕС, например, непрерывным способом производят 93,7 % всего разливаемого металла (сталь), в США – 88,9 %, в Японии – 96,9 %, в Украине лишь 8 %, а в среднем по всем странам мира не более 3,5 % [1].

Постановка проблемы

Современная МНЛЗ представляет собой сложный многомашинный агрегат с большим числом автоматизированных электроприводов, систем автоматического регулирования и контроля, которые обеспечивают не только геометрические размеры заготовок и качество их поверхности, но и существенно влияют на структуру и однородность металла по всему объему заготовки.

Высокая надежность систем автоматического регулирования и точность обработки электроприводами заданных законов особенно важны при производстве на МНЛЗ заготовок из цветных металлов и сплавов. Небольшая неточность или неисправность в работе автоматизированных электроприводов в этом случае могут привести к потере всей плавки, поскольку прочностные свойства у цветных металлов значительно ниже, чем у черных [2, 3].

Обоснование выбора технологических параметров процесса непрерывного литья чаще всего базируются на интуитивных, малофакторных методах оценки качества заготовок. Поэтому возникает необходимость исследования влияния технологических параметров непрерывного литья на повреждаемость заготовки как одного из показателей ее качества.

Анализ исследований и публикаций

В современной механике для описания процессов скрытого повреждения материалов используется концепция постоянного накопления повреждаемости в материалах [4]. Явление поврежденности представляет собой необратимый процесс накопления микротрещин и других дефектов в материалах в процессе их эксплуатации. Нашей задачей является определение параметра повреждаемости вязкого участка затвердевающей в кристаллизаторе МНЛЗ заготовки при различных технологических параметрах процесса непрерывного литья.

В работе [5] показано сравнение экспериментальных данных с расчетными кривыми, а анализ и сравнение экспериментальных и расчетных данных позволил сделать вывод об удовлетворительной точности найденных коэффициентов для определения значения параметра повреждаемости с помощью уравнений Бейли - Нортон и Работнова – Качанова [4].

Формулировка целей статьи

Цель работы – обеспечение качества технологического процесса непрерывного литья путем определения влияния на повреждаемость заготовки ее прямого и обратного движения во время преодоления силы трения покоя (СТП) и длительности цикла работы МНЛЗ.

© О. Н. Хорошилов, А. А. Павлова, 2013

Оценка параметров качества литой заготовки и выявление их зависимости от параметров технологического процесса непрерывного литья

В процессе непрерывного литья движение заготовки из кристаллизатора может осуществляться по нескольким различным технологическим процессам (ТП). Наиболее часто используемый ТП, с учетом инерционности электродвигателя и тянущей клетки, может быть представлен трапецеидальным импульсом на циклограмме (рис 1, а), где на интервале t_0-t_1 имеет место разгон от 0 до V_1 , а на интервале t_2-t_3 – торможение от V_1 до 0.

Известно, что после паузы при циклическом движении заготовки из кристаллизатора возникает сила трения покоя (СТП). Для преодоления СТП к заготовке прикладывается дополнительное усилие, которое в 1,4 раза превосходит усилие преодоления силы трения скольжения и приводит ее к дополнительной деформации [6, 7].

Для исключения дополнительной деформации заготовки был предложен технологический процесс непрерывного литья с реверсивным ее движением (в сторону кристаллизатора) в момент преодоления СТП [8]. Такой подход приводит к уплотнению вязкого участка заготовки и, следовательно, исключает ее деформацию, а стало быть, и повреждаемость в момент преодоления СТП. Один из вариантов циклограммы движения заготовки по предложенному технологическому процессу приведен на рис. 1, б.

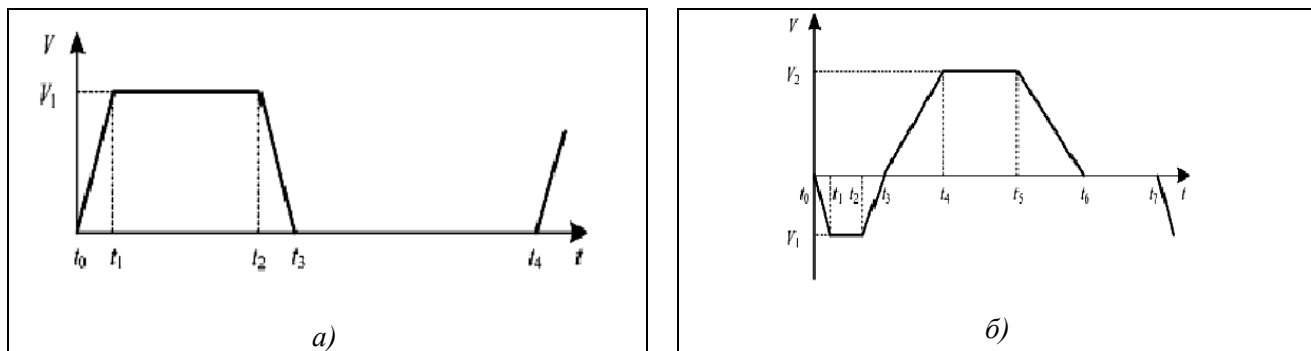


Рис. 1. Циклограммы движения заготовок при различных законах их извлечения из кристаллизатора: а - представление трапецеидального импульса на циклограмме; б - циклограмма движения заготовки по предложенному технологическому процессу

В качестве постоянных технологических параметров процесса непрерывного литья были приняты цикличность процесса движения заготовки из кристаллизатора с постоянным соотношением длительности ее движения к длительности паузы, $t_{ДВ}/t_{П}=0,25 - 0,3$ и постоянное напряжение в заготовке, равное 0,4 МПа.

В качестве изменяемых технологических параметров процесса непрерывного литья были выбраны: длительности цикла работы МНЛЗ, направление движения заготовки во время преодоления СТП, а также дополнительное усилие на преодоление СТП при различных направлениях движения заготовки во время преодоления СТП.

Для расчета используем три циклограммы движения заготовки при работе ГМНЛЗ: базовую циклограмму; циклограммы работы ГМНЛЗ, с учетом преодоления силы трения покоя при прямом и обратном движении заготовки. Эти циклограммы приведены на рис. 1. Для численного определения параметра повреждаемости используем программный комплекс для расчета

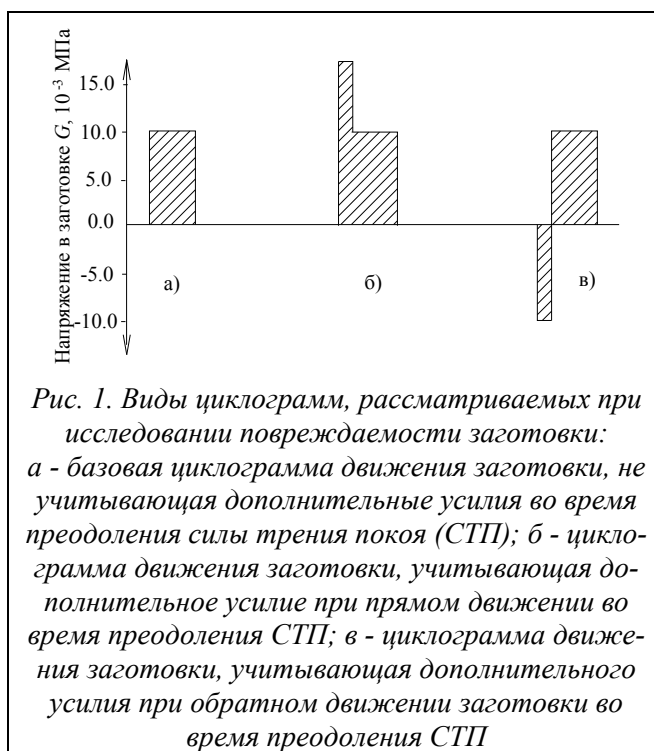


Рис. 1. Виды циклограмм, рассматриваемых при исследовании повреждаемости заготовки: а - базовая циклограмма движения заготовки, не учитывающая дополнительные усилия во время преодоления силы трения покоя (СТП); б - циклограмма движения заготовки, учитывающая дополнительное усилие при прямом движении во время преодоления СТП; в - циклограмма движения заготовки, учитывающая дополнительного усилия при обратном движении заготовки во время преодоления СТП

ползучести и длительной прочности оболочечных элементов, разработанный в НТУ «ХПИ» [9].

Расчет повреждаемости определяем на участке непрерывно-литой заготовки, на которой снята теплота перегрева, расположенном после фронта кристаллизации на величину шага $L=V_{ДВ}t_{ДВ}$. В начальный момент затвердевания заготовки затвердевшую корку будем рассматривать как тонкую оболочку, заполненную расплавом. Диаметр заготовки – 28 мм. Материал заготовки – бронза марки Бр. О10Ц2. В связи с термоконвективным расслоением расплава в кристаллизаторе затвердевшая корка (оболочка) заготовка имеет неравномерную толщину (от 0.75 мм на верхней до 1,5 мм на нижней образующей линии заготовки). Оболочка затвердевающей заготовки находится под неосесимметричным внутренним давлением и нагружена усилием растяжения от работы механизма извлечения заготовки $N = 0.4$ МПа. Поверхность оболочки считается нагруженной тангенциальными силами, которые моделируют силы трения при ее извлечении. Коэффициент трения $\alpha = 0.3$ [10].

В табл. 1 в качестве исходных данных представлены технологические характеристики циклов для базовой циклограммы работы ГМНЛЗ, представленной на рис. 1, а (напряжение в заготовке, длительность движения заготовки, длительность паузы).

Таблица 1. Исходные данные для расчета повреждаемости заготовки при работе ГМНЛЗ по базовой циклограмме

Длительность цикла $\tau_{ц}, c$	Длительность движения заготовки, $\tau_{дв}, c$	Длительность паузы, $\tau_{п}, c$	Напряжение в заготовке, σ, MPa
16	4	12	0.4
12	3	9	
8	2	6	

Деформация ползучести и повреждаемость заготовки на длительности цикла описываются следующими выражениями [4, 5]:

$$\dot{\epsilon}^0 = Bg_n(M) \frac{(\sigma_0)^n}{(1 - \omega^0)^m}, \tag{1}$$

$$\dot{\omega}^0 = Dg_n(M) \frac{(\sigma_0)^n}{(1 - \omega^0)^m}, \tag{2}$$

где $\omega^0(t_0 = 0) = 0$ – значение параметра повреждаемости в начальный момент времени;
 $\omega^0(t = t_*) = \omega_*$ – значение параметра повреждаемости при разрушении заготовки в момент времени t_* ;
 $g_n(M)$ - функция асимметрии цикла напряжений [4]

$$g_n(M) = \int_0^1 \left(1 + M \left\{ \frac{1}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} \left(\frac{\sin(\pi k / 2)}{\pi k} \cos \left(\frac{2\pi k}{t_{ц}} t_{ДВ} \right) - \frac{\cos(\pi k / 2) - 1}{\pi k} \sin \left(\frac{2\pi k}{t_{ц}} t_{ДВ} \right) \right) \right\} \right)^n d\xi. \tag{3}$$

На основе выражений (1 – 3) определяем зависимости повреждаемости заготовки для различных режимов. На рис. 2. приведена зависимость роста параметра повреждаемости для трех режимов процесса непрерывного литья, представленных в табл. 1, для базовой циклограммы (рис. 1, а).

Учитывая тот факт, что повреждаемость затвердевающей заготовки растет от цикла к циклу, по уравнению (2) определяем повреждаемость заготовки за среднее время ее движения в кристаллизаторе, которое составляет в среднем 500 с.



Из рис. 2 следует, что для трех различных режимов базовой циклограммы при длительностях цикла, равных 16, 12 и 8, рост параметра повреждаемости представляет одну зависимость.

Определим повреждаемость заготовки при учете усилий преодоления СТП при прямом движении заготовки, при котором возникают растягивающие напряжения. Данный характер движения заготовки представлен циклограммой рис. 1, б.

На рис. 3 приведены зависимости изменения параметра повреждаемости для трех режимов процесса непрерывного литья, представленных в табл. 2. В этом случае учитываются дополнительные усилия на преодоление СТП при прямом движении заготовки в кристаллизаторе, для длительностей цикла, равных 16, 12 и 8 с (кривые 1, 2, 3 соответственно).

В табл. 2 представлены исходные данные для трех режимов работы ГМНЛЗ с различной длительностью цикла, по циклограмме рис. 1, б.

Таблица 2. Исходные данные для расчета повреждаемости заготовок для трех режимов процесса непрерывного литья заготовок с различной длительностью цикла, при которых преодоление СТП происходит при прямом движении заготовки

Длительность преодоления силы трения покоя, $t_{СТП}$, с	Напряжение в заготовке при прямом движении во время преодоления СТП	Длительность цикла $\tau_{ц}$, с	Длительность движения заготовки, $\tau_{дв}$, с	Длительность паузы, $\tau_{п}$, с	Напряжение в заготовке при прямом движении, σ , МПа
0.5	0.5	16	4	12	0.4
		12	3	9	
		8	2	6	

Результаты изменения параметра повреждаемости заготовки при учете увеличения усилия извлечения заготовки на преодоление силы трения покоя представлены на рис. 3.

Зависимости рис. 3 показывают, что чем больше длительность цикла при движении заготовки, тем меньше параметр повреждаемости, а чем меньше длительность цикла, тем интенсивнее растет параметр повреждаемости.

Так, повреждаемость заготовки при длительности цикла 16 с за 500 с составляет 0.175 (зависимость 1), а повреждаемость при длительности цикла 8 с составляет 0.215 (зависимость 3).

Таким образом, определено, что преодоление СТП при прямом движении заготовки обуславливают увеличение параметра повреждаемости при уменьшении длительности цикла движения заготовки и наоборот.

Определим характер повреждаемости заготовки при учете усилий преодоления СТП при обратном движении. В табл. 3 представлены характеристики трех режимов работы ГМНЛЗ с различной длительностью цикла, по циклограмме рис. 1, в.

Результаты расчетов изменения параметра повреждаемости представлены на рис. 4. Зависимости рис. 4 показывают, что при обратном движении заготовки во время преодоления СТП получаем прямо пропорциональную зависимость величины параметра повреждаемости от длительности цикла при работе ГМНЛЗ, Учет параметра повреждаемости проводили за время пребывания заготовки в кристаллизаторе, т. е. за 500 с.

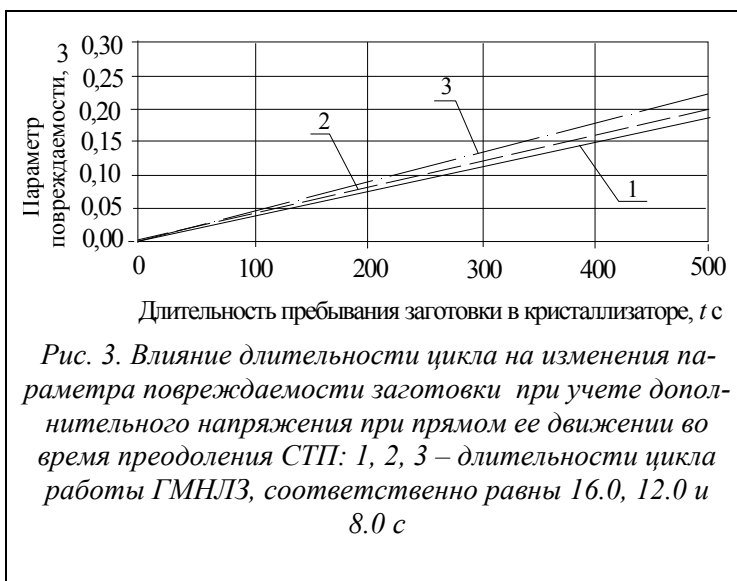


Рис. 3. Влияние длительности цикла на изменения параметра повреждаемости заготовки при учете дополнительного напряжения при прямом ее движении во время преодоления СТП: 1, 2, 3 – длительности цикла работы ГМНЛЗ, соответственно равны 16.0, 12.0 и 8.0 с

Таблица 3. Исходные данные для расчета повреждаемости заготовок для трех режимов процесса непрерывного литья заготовок с различной длительностью цикла при использовании обратного движения заготовки

Длительность обратного движения, t_{OTP} , с	Напряжение в заготовке при обратном движении σ_{OTP} , МПа	Длительность цикла $\tau_{ц}$, с	Длительность движения заготовки, $\tau_{дв}$, с	Длительность паузы, $\tau_{п}$, с	Напряжение в заготовке при прямом движении, σ , МПа
0.5	-0.5	16	4	12	0.4
		12	3	9	
		8	2	6	

Так, параметр повреждаемости заготовки при длительности цикла 16 с за 500 с составляет 0.135 (зависимость 1), а повреждаемость при длительности цикла 8 с составляет 0.09 (зависимость 3). Таким образом, определено, что при увеличении длительности цикла при работе ГМНЛЗ при обратном движении заготовки увеличивается параметр повреждаемости и наоборот. На основе данных, представленных на рис. 3 и 4, были построены зависимости параметра повреждаемости заготовки от длительности цикла работы ГМНЛЗ для процесса непрерывного литья, учитывающего дополнительное усилие на преодоление СТП при прямом и обратном движении заготовки (рис. 5).

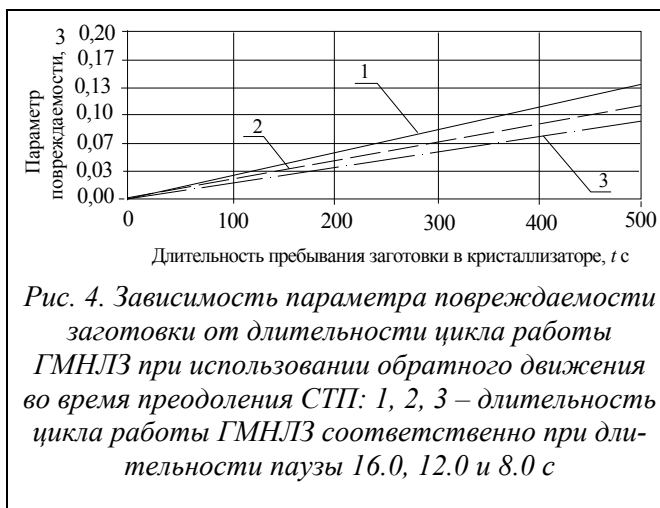


Рис. 4. Зависимость параметра повреждаемости заготовки от длительности цикла работы ГМНЛЗ при использовании обратного движения во время преодоления СТП: 1, 2, 3 – длительность цикла работы ГМНЛЗ соответственно при длительности паузы 16.0, 12.0 и 8.0 с

Анализ зависимостей, представленных на рис. 5, показывает, что для процесса непрерывного литья при прямом движении заготовки во время преодоления СТП уменьшение длительности цикла работы ГМНЛЗ приводит к повышению повреждаемости заготовки (кривая 2), так, при уменьшении длительности цикла с 16.0 до 8.0 с параметр повреждаемости возрастает от значения $\omega=0.175$ до $\omega=0.215$ т. е. в 1.23 раза. При обратном движении заготовки во время преодоления СТП уменьшение длительности цикла работы ГМНЛЗ приводит к снижению повреждаемости заготовки (кривая 3) при уменьшении длительности цикла с 16.0 до 8.0 с параметр повреждаемости снижается от значения $\omega=0.135$ до $\omega=0.09$, т. е. в 1.5 раза. Для длительности цикла равного 8.0 с параметр повреждаемости при прямом движении заготовки составляет $\omega=0.215$, а при обратном движении - $\omega=0.09$. Таким образом, замена прямого движения заготовки на обратное во время преодоления СТП позволяет снизить параметр повреждаемости в 2.39 раза.



Рис. 5. Влияние длительности цикла движения заготовки на параметр повреждаемости заготовки диаметром 0.08 м бронзы марки Бр. О10Ц2

1 – зависимость повреждаемости заготовки для технологического процесса без учета дополнительного усилия для преодоления СТП; 2 - зависимость повреждаемости заготовки для технологического процесса с учетом дополнительного усилия на преодоление СТП при прямом движении заготовки; 3 - зависимость повреждаемости заготовки для процесса непрерывного литья с применением обратного движения во время преодоления СТП.

Итоговые зависимости, представленные на рис. 5, позволяют проводить выбор параметров технологического процесса непрерывного литья по критерию заданной повреждаемости заготовки.

Выводы

Выявлены зависимости повреждаемости заготовки от длительности цикла и характера ее движения во время преодоления СТП, что позволило сделать вывод о том, что при замене прямого движения заготовки на обратное во время преодоления СТП позволяет снизить повреждаемость в 2.39 раза. Т. е. регулировка технологических параметров процесса непрерывного литья позволяет значительно увеличить качество заготовки.

Литература

1. Материалы научно-технического семинара Прогрессивные методы непрерывной разливки стали и сплавов, 18-19 июня 1996 г., Решение НТС. К.: ФТИМС, 1996 – 15с.
2. Исследования влияния технологических параметров на качество заготовок / В. Н. Бредихин, Ф. П. Изюмский, Е. А. Суходольская и др. // Цвет. металлы. – 1976. – № 12. – С. 51-53.
3. Хорошилов, О. Н. Метод керування якістю поверхні безперервно-ливої заготовки / О. Н. Хорошилов, О. И. Пономаренко // Процеси лиття. – 2006. – №4. – С. 47–53.
4. Lemaitre J. Mechanics of solid materials / J. Lemaitre, J.-L. Chaboche – Cambridge: University press, 1994. – 556 p.
5. Бреславский, Б.Д. Уравнение состояния циклической ползучести бронзовых сплавов / Б. Д. Бреславский, О. А. Татарина, О. Н. Хорошилов // Вест. НТУ «ХПИ». – 2007 – №38. — С. 36–41.
6. Бреславский, Д. В. Кинетические уравнения повреждаемости циклически нагруженных тел / Д. В. Бреславский // Динамика и прочность машин. Респ. межвед. н-т. сборник. – Харьков: ХГПУ. – 1998. – № 56. – С. 132–139.
7. Altenbach, H. Cyclic Creep-Damage in Thin-Walled Structures / H. Altenbach, D. Breslavsky, O. Morachkovsky, K. Naumenko // Journal of Strain Analysis for Engineering Design. Suffolk, UK. – 2000. – Vol.35. – No 1. – P. 1–11.
8. Горизонтальная машина непрерывного литья с автоматизированным безредукторным электроприводом на базе двигателя с катящимся ротором / О. Н. Хорошилов, А. В. Кипенский, В. В. Лысенко и др. // Віс. Нац. техн. ун-ту «ХПІ». Сер. Електротехніка, електроніка та електропривід – Харків: НТУ «ХПІ», 2008. – № 30. – С. 175–178.
9. Бреславский, Д. В. Высокотемпературная ползучесть и длительная прочность элементов конструкций при циклическом нагружении / Д. В. Бреславский, О. К. Морачковский, О.А.Татарина // Пробл. прочности. – 2008. – №5. – С. 45–53
10. Горизонтальное непрерывное литье цветных металлов и сплавов / О. А. Шатагин, В. Т. Сладкошteeв, М. А. Вартазаров и др. - М.: Металлургия, 1974. - 175 с.
11. Naniy, V. Microprocessor control of the motor with rolling rotor / V. Naniy, A. Kipenskiy // Proc. International Conf. on Unconventional Electromechanical and Electrical Systems (UEES'97). – Szczecin (Poland). – 1997. – P. 999–1006.

Поступила в редакцию 21.09.13