

УДК 621.074.

**Бреславский Д. В., Хорошилов О. Н., Пономаренко О. И.**

## **УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ НЕПРЕРЫВНОЛИТЫХ ЗАГОТОВОК**

Важнейшей задачей для предприятий литейного производства является их техническое перевооружение, повышение производительности машин и качества литых заготовок на базе освоения новых технологий. В настоящее время в мире поддерживается тенденция ежегодного прироста выплавки цветных сплавов на 4,5–5 %, что касается и медных сплавов. Этим объясняется повышение требований к качеству непрерывно-литых заготовок, которые не должны иметь дефектов в виде микротрещин, как на поверхности, так и в объеме заготовки.

В работе [1] для обеспечения качества непрерывно – литых заготовок приведены ориентировочные технологические параметры. 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.

В современной механике для описания процессов скрытого повреждения материалов используется концепция постоянного накопления повреждаемости в материалах [2]. 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 машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) заготовки при различных технологических параметрах процесса непрерывного литья.

В работе [3] 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 – Норттона и Работнова – Качанова [2].

Целью данных исследований является определение влияния на повреждаемость заготовки ее прямого и обратного движения во время преодоления силы трения покоя (СТП) и длительности цикла работы ГМНЛЗ.

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, равному  $t_{ДВ}/t_{П} = 0,25 - 0,3$  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 дополнительные усилия 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 ползучести и длительной прочности оболочечных элементов, разработанный в НТУ «ХПИ» [4].

Расчет повреждаемости будем определять 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 рассматриваем 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  $\alpha = 0,3$  [1].

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).

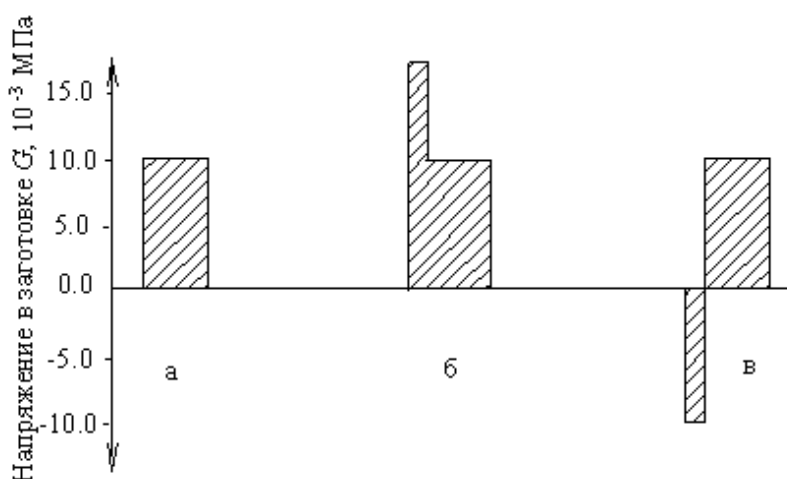


Рис. 1. Виды циклограмм, рассматриваемых при исследовании повреждаемости заготовки:

(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 дополнительное усилие при обратном движении заготовки во время преодоления СТП

Таблица 1

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

Длительность цикла $\tau_{ц}, с$	Длительность движения заготовки, $\tau_{об}, с$	Длительность паузы, $\tau_{п}, с$	Напряжение в заготовке, $\sigma, МПа$
16	4	12	0,4
12	3	9	
8	2	6	

Деформация ползучести и повреждаемость заготовки на длительности цикла описываются следующими выражениями [2, 3]:

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

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

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, то по уравнению (2) определяем повреждаемость заготовки за среднее время ее движения в кристаллизаторе, которое составляет в среднем 500 с.

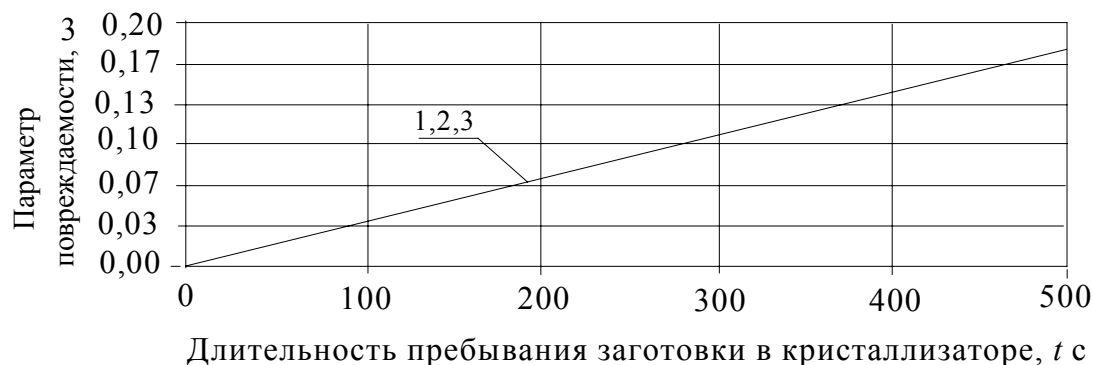


Рис. 2. Зависимость от скорости движения заготовки параметра ее повреждаемости без учета направленности ее движения во время преодоления СТП и при длительностях цикла, равных:

1 – 8,0; 2 – 12,0; 3 – 16,0 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.

Таблиця 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, $\sigma$ , 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.

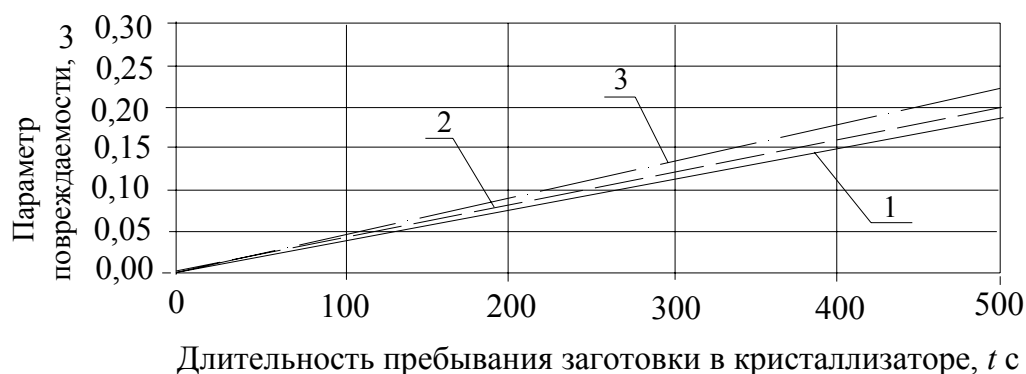


Рис. 3. Влияние длительности цикла на изменения параметра повреждаемости заготовки при учете дополнительного напряжения при прямом ее движении во время преодоления СТП:

1, 2, 3 – длительности цикла работы ГМНЛЗ, соответственно равны: 16,0; 12,0; 8,0 с.

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 величина параметра повреждаемости от длительности цикла при работе ГМНЛЗ, Учет параметра повреждаемости проводили за время пребывания заготовки в кристаллизаторе, т. е. за 500 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 $\sigma_{OTP}$ , МПа	Длительность цикла $\tau_{ц}$ , с	Длительность движения заготовки, $\tau_{дв}$ , с	Длительность паузы, $\tau_{п}$ , с	Напряжение в заготовке при прямом движении, $\sigma$ , МПа
0,5	-0,5	16	4	12	0,4
		12	3	9	
		8	2	6	

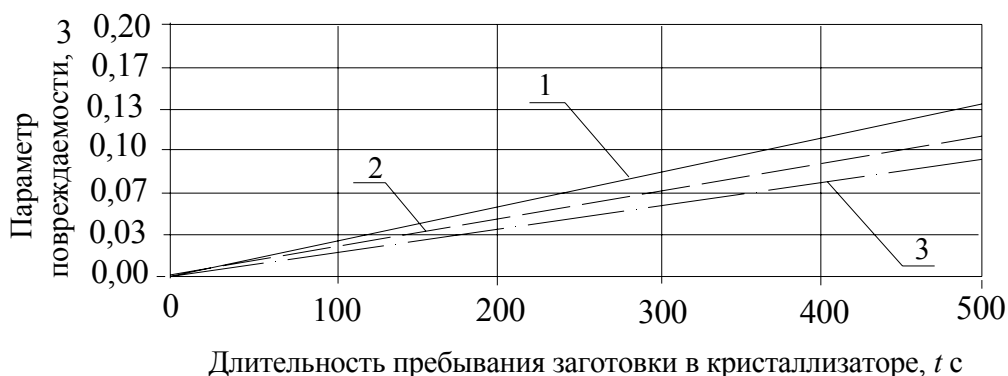


Рис. 4. Зависимость параметра повреждаемости заготовки от длительности цикла работы ГМНЛЗ при использовании обратного движения во время преодоления СТП:

1, 2, 3 – длительность цикла работы ГМНЛЗ, соответственно при длительности паузы 16,0; 12,0; 8,0 с

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).

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.

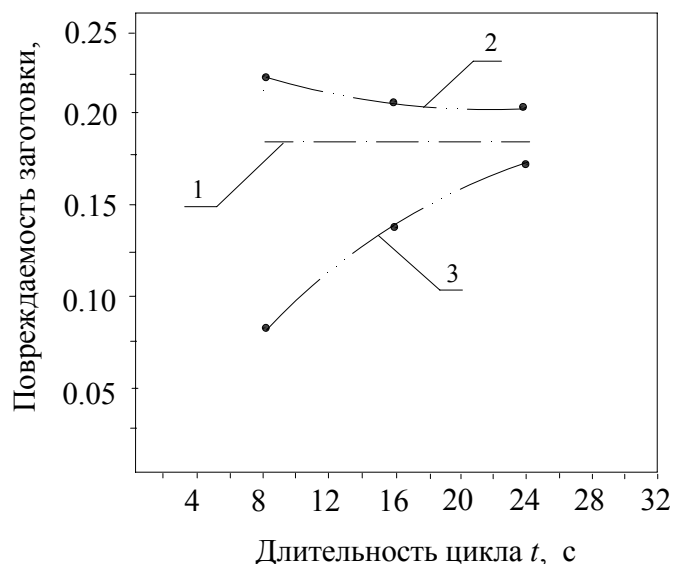


Рис. 5. Влияние длительности цикла движения заготовки на параметр повреждаемости заготовки  $\varnothing 0,08$  м из бронзы марки БрО10Ц2:

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

Установлены зависимости повреждаемости заготовки от длительности цикла и характера движения заготовки во время преодоления силы трения покоя. Замена прямого движения заготовки на обратное во время преодоления силы трения покоя позволяет снизить повреждаемость в 2,39 раза, что способствует значительному улучшению качества заготовки.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Горизонтальное непрерывное литье цветных металлов и сплавов / О. А. Шатагин, В. Т. Сладкоштитев, М. А. Вартазаров и др. – М. : Металлургия, 1974. – 175 с.
2. Lemaître J. *Mechanics of solid materials* / J. Lemaître, J.-L. Chaboche. – Cambridge : University press, 1994. – 556 p.
3. Бреславский Б. Д. Уравнение состояния циклической ползучести бронзовых сплавов / Б. Д. Бреславский, О. А. Татарина, О. Н. Хорошилов // Вестник НТУ «ХПИ» : сборник научных трудов. Тематический выпуск. – 2007. – № 38. – С. 36–41.
4. Бреславский Д. В. Высокотемпературная ползучесть и длительная прочность элементов конструкций при циклическом нагружении / Д. В. Бреславский, О. К. Морачковский, О. А. Татарина // Проблемы прочности. – 2008. – № 5. – С. 45–53.