

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

*Хорошилов О.Н., д-р техн. наук, проф.
Украинская инженерно-педагогическая академия*

*Кипенский А.В., д-р техн. наук, проф.
Национальный технический университет (Харьковский политехнический институт)*

АНАЛИЗ КАЧЕСТВА НЕПРЕРЫВНО-ЛИТЫХ ЗАГОТОВОК ИЗ МЕДНЫХ СПЛАВОВ ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

horol@i.ua

На предприятиях машиностроительного комплекса широко применяют машины непрерывного литья для производства заготовок из медных сплавов диаметром 0,03...0,06 м. За последнее десятилетие прослеживается тенденция увеличения потребности в заготовках на 3,0...5,0% в год. Однако в настоящее время, в силу устаревшей базовой технологии процесса непрерывного литья дальнейшее, повышение производительности машин непрерывного литья приводит к ухудшению качества заготовок. Один из важнейших показателей качества прочность заготовки. Повысить качество заготовок можно путем изменения последовательности технологических операций процесса непрерывного литья. Количественное значение показателей качества связано с параметром повреждаемости, полученным на основе теории континуальной повреждаемости.

В ходе исследований графоаналитическим методом определили динамику изменения качества заготовки в зависимости от базового и усовершенствованного технологического процесса при постоянной производительности машины непрерывного литья. Установлено, что при использовании усовершенствованного технологического процесса повышение частоты движения заготовки в интервале 0,0417...0,125 Гц в сочетании с реверсивным движением заготовки во время преодоления силы трения покоя позволяет повысить прочностные характеристики заготовок от 436 до 450 МПа. Это в свою очередь позволит при заданной производительности машины непрерывного литья повысить качество заготовок.

Ключевые слова: медные сплавы, заготовка, повреждаемость, прочность при испытании на растяжение, графоаналитический метод.

Введение. История возникновения непрерывной разливки металлов и сплавов восходит к началу XIX века, когда Дж. Лайнгу был выдан американский патент на устройство для горизонтального непрерывного литья свинцовых труб (1826 г.). В патентах, выданных в последующие пятьдесят лет, конструкция Дж. Лайнга была лишь частично усовершенствована. Однако в 1881 г. Мак Эльроу был выдан патент на способ и устройство для производства труб из стали и цветных металлов, где для вытягивания заготовки использовались вращающиеся валки. Такой технологический процесс получил название «непрерывное литье», поскольку заготовка вытягивалась с постоянной скоростью. 1886 г. – Б. Ата сделал сообщение о разливке металла в слитки, которые вытягивались из кристаллизатора тянущими валками периодическим способом, за счет чего была достигнута стабильность в технологическом процессе. Эта установка находилась в эксплуатации до 1910 г.

В СССР работы по непрерывной разливке металлов начались в 30-х годах XX в. Большое

значение в этом направлении сыграли работы братьев А.Н. и А.Н. Мясоедовых. Широкое внедрение непрерывного литья в практику началось у нас около 70 лет назад [1]. Однако скоро темпы были утеряны, а такие развитые страны как Япония, США, ФРГ, Италия, Франция и др., приобретя у СССР лицензии, продолжали совершенствовать конструкции машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ). Технологический процесс непрерывного литья в индустриально развитых странах превратился в одно из важнейших звеньев металлургического производства, в значительной степени определяющее его эффективность и всей металлопродукции. Так в странах ЕС непрерывным способом производят 93,7 % всего разливаемого металла (стали), в США – 88,9 %, в Японии – 96,9 % в Украине – 8 %, а в среднем по всем странам мира – 3,5 % [2].

Преимущества же непрерывного литья очевидны. При разливке металлов и сплавов на МНЛЗ увеличивается выход годной продукции на 10-15%, снижается ее себестоимость, улучшаются условия труда, повышается его произ-

водительность. Значительный эффект дает сокращение капитальных затрат на строительство металлургических цехов и заводов, так как из их составов исключается все 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 [3-4].

При производстве непрерывно-литых заготовок из цветных металлов и сплавов наиболее важными проблемами является обеспечение стабильности процесса непрерывного литья, заданного качества заготовок, максимальной производительности МНЛЗ. Именно поэтому, не смотря на почти двухсотлетнюю историю непрерывного литья, совершенствование технологического процесса продолжается и в наши дни.

Цель настоящей работы состоит в сравнительном анализе качества непрерывно-литых заготовок из медных сплавов, полученных на горизонтальной МНЛЗ с использованием различных технологических процессов.

Методология. Качество заготовок будем оценивать по характеру их прочностных свойств, которые, в свою очередь, связаны с параметром повреждаемости. При проведении исследований для разных технологических процессов была обеспечена одинаковая производительность МНЛЗ, которая в общем случае зависит от скорости движения заготовки, длительности интервала движения заготовки и продолжительности паузы между интервалами движения.

Повреждаемость непрерывно-литых заготовок определяли на основе теории континуальной повреждаемости по уравнениям Бейли-Нортон и Работнова-Качанова [5]:

$$\dot{\epsilon} = B \frac{\sigma^n}{(1-\gamma)^m}; \quad (1)$$

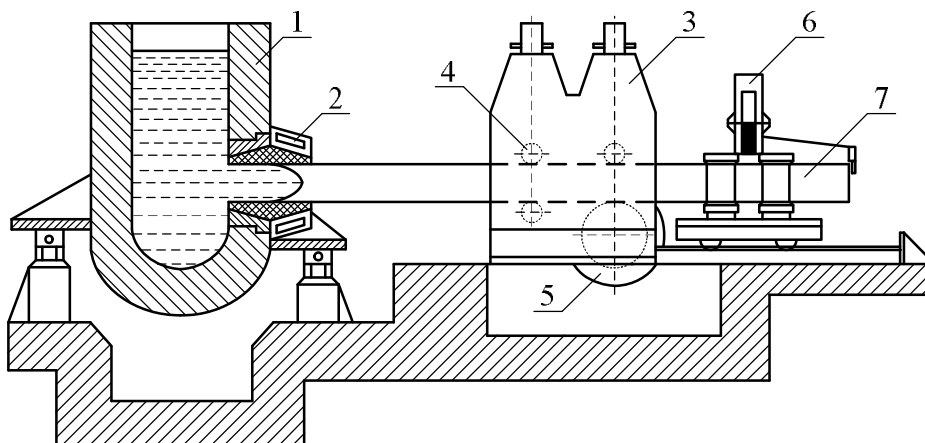


Рис. 1. Горизонтальная машина непрерывного литья заготовок

$$\dot{\gamma} = D \frac{\sigma^n}{(1-\gamma)^m} \begin{cases} \text{при } t = 0, \gamma = 0; \\ \text{при } t = t_*, \gamma = 1, \end{cases} \quad (2)$$

где $\dot{\epsilon}$ – скорость ползучести; $\dot{\gamma}$ – скорость повреждаемости; γ – параметр повреждаемости; t – текущее время воздействия механического напряжения в поперечном сечении заготовки; t_* – временной интервал, по истечении которого происходит разрушение заготовки; B, D, n, m – константы ползучести и разрушения материала, определяемые по экспериментальным данным.

Прочность заготовки определяли экспериментальным путем как предел прочности на растяжение согласно ГОСТ 1050-88.

Схема горизонтальной МНЛЗ с неподвижным кристаллизатором и реверсивным электроприводом приведена на рис. 1 [6,7]. Основными узлами машины являются: металлоприемник 1, водоохлаждаемый кристаллизатор 2; тянущая клеть 3, валки 4 тянущей клетки; электродвигатель 5, устройство 6 для резки заготовки 7 на мерные длины.

В процессе анализа сравнивали качество заготовок, полученных по традиционной (базовой) технологии [4] и по усовершенствованного технологического процесса непрерывного литья [3].

При базовой технологии закон изменения скорости движения заготовки задают в виде прямоугольного импульса $V_{ДВ}$ с длительностью $\tau_{ДВ}$ (интервал t_0-t_3) и продолжительностью $\tau_{П}$ пауз (интервал t_3-t_5) между импульсами (см. рис. 2, пунктирная линия). Однако в реальных условиях, из-за инерционности электродвигателя и тянущей клетки идеальный импульс движения заменяется трапецеидальным импульсом (рис 2, сплошная линия), в котором имеет место разгон от 0 до $V_{ДВ1}$ на интервале t_0-t_1 и торможение от $V_{ДВ1}$ до 0 на интервале t_3-t_4 .

При циклическом движении заготовки (продолжительность цикла базового процесса $\tau_{БЦ} = \tau_{ДВ} + \tau_{П}$) из кристаллизатора возникает сила трения покоя (СТП). Для преодоления СТП к заготовке прикладывается дополнительное усилие, которое приводит к ее растягиванию и вызывает ее повреждаемость. Завершение преодоления СТП проявляется кратковременным повышением скорости до некоторого уровня $V_{ДВ2}$ (рис. 2, интервал времени t_1-t_2), что обусловлено инерционностью системы движения. На рис. 2 реальный закон изменения скорости $V_{ДВ}$ движения заготовки аппроксимирован прямыми линиями.

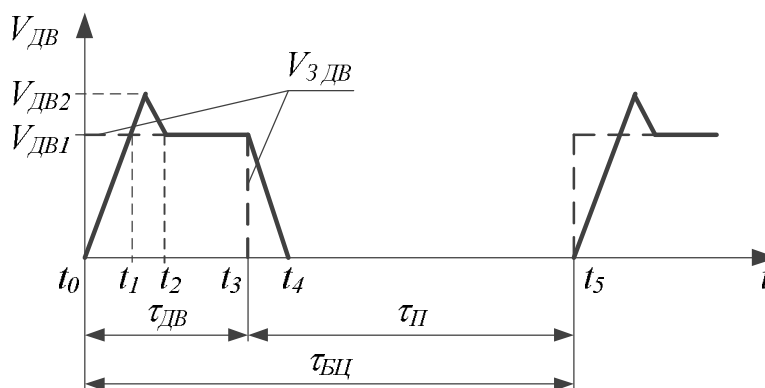


Рис. 2. Диаграмма движения заготовки при базовой технологии непрерывного литья заготовок

Изменение направления движения заготовки и формирование заданного закона изменения скорости на каждом из интервалов движения в течение цикла (продолжительность цикла ново-

Совершенствование технологического процесса непрерывного литья заготовок из медных сплавов осуществляли с целью снижения их повреждаемости при преодолении СТП. Суть нового технологического процесса состоит в том, что в начале цикла осуществляется обратное движение заготовки (в сторону кристаллизатора) со скоростью $V_{ДВ-}$ в течение временного интервала $\tau_{ДВ-}$ (см. рис. 3, интервал t_0-t_1). Такой подход приводит к уплотнению вязкого участка заготовки и снижает ее повреждаемость. Затем осуществляют прямое движение заготовки (из кристаллизатора) со скоростью $V_{ДВ+}$ в течение временного интервала $\tau_{ДВ+}$ (рис. 3, интервал t_1-t_2).

го процесса $\tau_{НЦ} = \tau_{ДВ+} + \tau_{ДВ-} + \tau_{П}$) обеспечивалось микропроцессорной системой управления реверсивным электроприводом на базе двигателя с катящимся ротором (ДКР) [8].

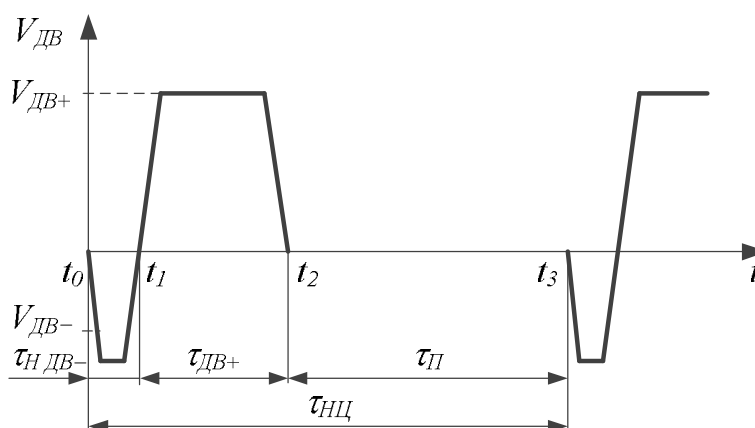


Рис. 3. Диаграмма движения заготовки при новой технологии непрерывного литья заготовок

Для сравнительного анализа качества непрерывно-литых заготовок был использован графоаналитический метод. Суть этого метода состоит в том, что в квадрантах координатной плоскости последовательно строят ряд промежуточных характеристик в виде известных

функциональных зависимостей. При этом для удобства и упрощения математических выкладок по всем осям квадрантов устанавливают такие же знаки, как и в первом квадранте. Кроме того, аргумент в каждой последующей функциональной зависимости, должен являться функ-

цией предшествующей функциональной зависимости. В случае анализа, искомую характеристику в графическом виде получают в свободном квадранте координатной плоскости путем совмещения абсцисс исходной зависимости с соответствующими ординатами последней из построенных функциональных зависимостей. Для определения аналитических выражений полученных графических зависимостей используется ряд дополнительных операций, заключающихся в перемещении исходных характеристик по квадрантам координатной плоскости. Каждому виду перемещений соответствуют определенные переходные уравнения, позволяющие записывать аналитические выражения для построенных в графическом виде функциональных зависимостей [9].

Основная часть. Помимо указанных выше технологических параметров непрерывного литья, при анализе качества заготовок будем использовать еще ряд параметров.

1. Частота извлечения заготовки из кристаллизатора, Гц:
при базовом технологическом процессе

$$f_B = 1/\tau_{БЦ}; \tag{3}$$

при новом технологическом процессе

$$f_H = 1/\tau_{НЦ}. \tag{4}$$

2. Шаг извлечения заготовки из кристаллизатора, м:
при базовом технологическом процессе

$$L_B = V_{БСР}\tau_{БДВ}; \tag{5}$$

при новом технологическом процессе

$$L_H = V_{НСР+}\tau_{ДВ+} - V_{НСР-}\tau_{ДВ-}, \tag{6}$$

где $V_{БСР}$ – среднее значение скорости движения заготовки на реальном временном интервале $\tau_{БДВ}$ (рис. 2, интервал времени t_0-t_4) ее извлечения из кристаллизатора при базовом

технологическом процессе; $V_{НСР+}$ – среднее значение скорости при прямом движении заготовки на интервале $\tau_{ДВ+}$ (рис. 3) нового технологического процесса; $V_{НСР-}$ – среднее значение скорости при обратном движении заготовки на интервале $\tau_{ДВ-}$ (рис. 3) нового технологического процесса.

3. Производительность МНЛЗ, м/с:
при базовом технологическом процессе

$$P_B = L_B f_B; \tag{7}$$

при новом технологическом процессе

$$P_H = L_H f_H. \tag{8}$$

При проведении сравнительного анализа базового и нового технологических процессов зададимся условием, которое обеспечивает стабильность процесса непрерывного литья и может быть представлено соотношением

$$\frac{\tau_{ДВ}}{\tau_{БЦ}} = \frac{\tau_{ДВ+}}{\tau_{НЦ}} = 0,25. \tag{9}$$

Анализ качества непрерывно-литых заготовок, полученных при использовании базового технологического процесса, начнем с графического определения взаимосвязи производительности МНЛЗ (см. выражение (7)) и частоты извлечения заготовки. Для этого будем использовать данные, полученные экспериментальным путем и приведенные в табл. 1. Из таблицы видно, что для повышения производительности P_B МНЛЗ увеличивали скорость $V_{ДВ}$ движения заготовки, однако для обеспечения стабильности технологического процесса несколько снижали длительность $\tau_{ДВ}$ интервала движения заготовки. При этом соотношение (9) оставляли без изменений, что и приводило к увеличению частоты извлечения заготовки f_B .

Таблица 1

Параметры базового технологического процесса непрерывного литья заготовок

Скорость движения заготовки $V_{ДВ}, 10^{-3} \text{ м/с}$	Длительность интервала движения заготовки $\tau_{ДВ}, \text{ с}$	Длительность цикла $\tau_{БЦ}, \text{ с}$	Частота извлечения заготовки, $f_B, \text{ Гц}$	Производительность МНЛЗ $P_B, 10^{-3} \text{ м/с}$
1	2	3	4	5
13,7	6,0	24,0	0,0417	3,26
14,8	4,0	16,0	0,0625	3,52
17,2	3,0	12,0	0,083	4,01
19,0	2,5	10,0	0,100	4,4
21,2	2,0	8,0	0,125	5,03

Используя значения, приведенные в столбцах 4 и 5 табл. 1, в четвертом квадранте координатной плоскости построим зависимость частоты f_B извлечения заготовки от производительности P_B МНЛЗ (рис. 4, кривая 4).

Далее, в третьем квадранте координатной плоскости строим зависимость параметра γ_B повреждаемости от частоты f_B извлечения заготов-

ки (рис. 4, кривая 3). Для этого воспользуемся данными табл. 2.

Во втором квадранте координатной плоскости строим зависимость прочности σ_B заготовки от параметра γ_B ее повреждаемости (рис. 4, кривая 2). Построение указанной зависимости выполним, используя экспериментальные данные, полученные при производстве непре-

рывно-литых заготовок из бронзы марки Бр О5Ц5С5 и приведенные в табл. 3.

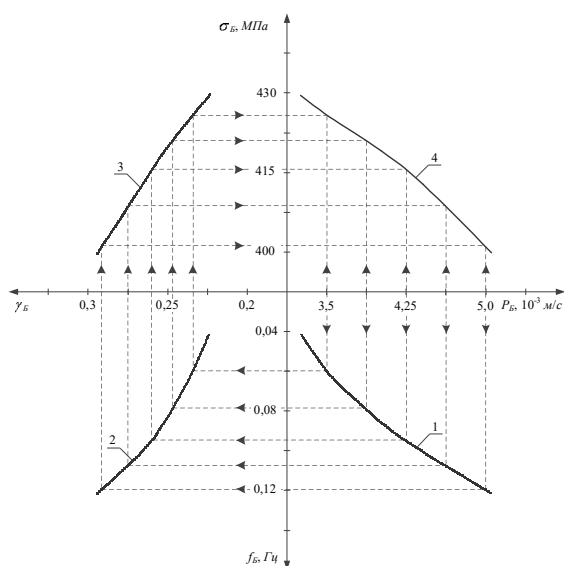


Рис. 4. Анализ качества непрерывно-литых заготовок, произведенных по базовой технологии

Таблица 2
Значения параметра повреждаемости непрерывно-литой заготовки, изготовленной по базовой технологии

f_B , Гц	0,0417	0,0625	0,083	0,100	0,125
γ_B	0,225	0,237	0,255	0,27	0,3

Таблица 3
Результаты экспериментальных исследований прочности непрерывно-литых заготовок, полученных по базовой технологии, при различных значениях параметра их повреждаемости

γ_B	0,225	0,237	0,255	0,27	0,3
σ_B , МПа	429,5	425,5	419	412,8	400

Для определения зависимости прочности непрерывно-литых заготовок, полученных при

использовании базового технологического процесса, от производительности МНЛЗ, совместим в первом квадранте координатной плоскости (рис. 4) абсциссы кривой 4 и соответствующие ординаты кривой 2. В результате последовательного соединения точек I-V пересечения абсцисс и ординат получим в графическом виде искомую зависимость прочности σ_B от производительности P_B (рис. 4, кривая 1). Из рисунка видно, что при использовании базового технологического процесса прочность непрерывно-литой заготовки, а, следовательно, и ее качество снижаются при увеличении производительности МНЛЗ. После определения координат точек I-V пересечения, зависимость $\sigma_B(P_B)$ может быть аппроксимирована полиномом вида

$$\sigma_B = a_0 + a_1(P_B) + a_2(P_B)^2 + \dots + a_m(P_B)^m, \quad (10)$$

где a_1, a_2, \dots, a_m – коэффициенты, значения которых определяются с учетом количества членов полинома.

Параметры нового технологического процесса непрерывного литья заготовок сведены в табл. 4. Для повышения производительности P_H МНЛЗ в ходе проведения исследований, также как и при базовом технологическом процессе, увеличивали скорость $V_{ДВ+}$ и снижали длительность $\tau_{ДВ+}$ интервала прямого движения заготовки. При этом параметры обратного движения и соотношение (9) во всех случаях оставляли без изменений, что соответственно увеличивало частоту извлечения заготовки f_H .

Для анализа качества непрерывно-литых заготовок, произведенных в соответствие с новым технологическим процессом, по данным столбцов 6 и 7 табл. 4 построим в четвертом квадранте координатной плоскости зависимость частоты f_H извлечения заготовки от производительности P_H МНЛЗ (рис. 5, кривая 4).

Таблица 4.

Параметры нового технологического процесса непрерывного литья заготовок

Скорость обратного движения заготовки $V_{ДВ-}$, 10^{-3} м/с	Скорость прямого движения заготовки $V_{ДВ+}$, 10^{-3} м/с	Длительность интервала обратного движения заготовки $\tau_{ДВ-}$, с	Длительность интервала прямого движения заготовки $\tau_{ДВ+}$, с	Длительность цикла $\tau_{ИЦ}$, с	Частота извлечения заготовки, f_H , Гц	Производительность МНЛЗ P_H , 10^{-3} м/с
1	2	3	4	5	6	7
14,0	16,5	0,5	6,0	24,0	0,0417	3,32
14,0	18,4	0,5	4,0	16,0	0,0625	3,59
14,0	21,8	0,5	3,0	12,0	0,083	4,09
14,0	24,2	0,5	2,5	10,0	0,100	4,42
14,0	27,0	0,5	2,0	8,0	0,125	5,04

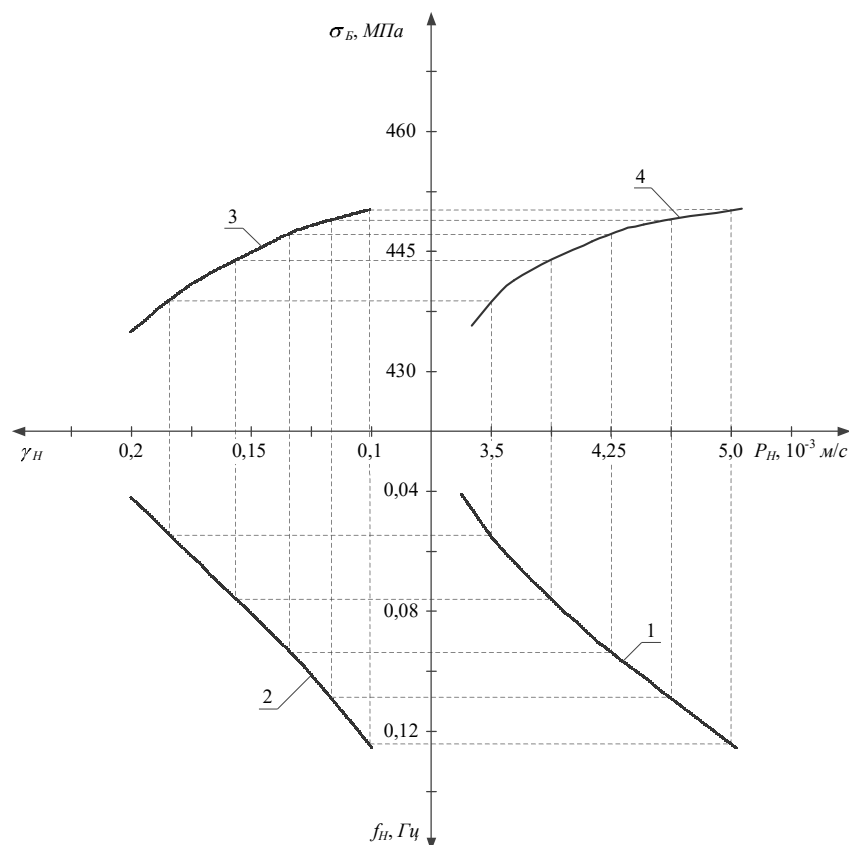


Рис. 5. Анализ качества непрерывно-литых заготовок, произведенных по новой технологии

В третьем квадранте координатной плоскости строим зависимость параметра γ_n повреждаемости от частоты f_n извлечения заготовки (рис.

5, кривая 3). Для этого воспользуемся данными табл. 5.

Таблица 5

Значения параметра повреждаемости непрерывно-литой заготовки, изготовленной по усовершенствованной технологии

$f_n, Гц$	0,0417	0,0625	0,083	0,100	0,125
γ_n	0,2	0,175	0,142	0,126	0,1

Зависимость прочности σ_n заготовки от параметра γ_n ее повреждаемости строим во втором квадранте координатной плоскости (рис. 5, кривая 2). Для построения указанной зависимости будем использовать экспериментальные данные, полученные при производстве непрерывно-литых заготовок из бронзы марки Бр О5Ц5С5 и приведенные в табл. 6.

Таблица 6.

Результаты экспериментальных исследований прочности непрерывно-литых заготовок, полученных по усовершенствованной технологии, при различных значениях параметра их повреждаемости

γ_n	0,2	0,175	0,142	0,126	0,1
$\sigma_n, МПа$	435	440,75	445,8	4447,9	450

Зависимость прочности непрерывно-литых заготовок, полученных при использовании ново-

го технологического процесса, от производительности МНЛЗ определим, совместив в первом квадранте координатной плоскости (рис. 5) абсциссы кривой 4 и соответствующие ординаты кривой 2. Далее последовательного соединения точек I-V пересечения абсцисс и ординат получим в графическом виде искомую зависимость прочности σ_n от производительности P_n (рис. 5, кривая 1). Из приведенного рисунка видно, что при использовании нового технологического процесса прочность непрерывно-литой заготовки, а, следовательно, и ее качество улучшаются при увеличении производительности МНЛЗ предложенным способом. Определив координаты точек I-V пересечения, зависимость $\sigma_n(P_n)$ можно аппроксимировать полиномом вида

$$\sigma_n = b_0 + b_1(P_n) + b_2(P_n)^2 + \dots + b_m(P_n)^m, \quad (11)$$

где b_1, b_2, \dots, b_m – коэффициенты, значения которых определяются с учетом количества членов полинома.

Выводы. В ходе проведенных исследований получены зависимости влияния производительности машины непрерывного литья (частоты извлечения заготовки из кристаллизатора) на механические свойства заготовок из бронзы марки Бр. О5Ц5С5 для базового и нового процесса непрерывного литья:

- повышение частоты извлечения заготовки от 0,0417 до 0,125 Гц и линейной производительности МНЛЗ от 3,32 до 5,04 10^{-3} м/с для базового процесса приводило к снижению механических характеристик заготовок от 429,5 до 400 МПа;

- повышение частоты извлечения заготовки и производительности МНЛЗ в тех же интервалах для разработанного процесса непрерывного литья обусловила повышение прочностных характеристик заготовок в интервале 436...450 МПа.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Марголин Ш.М. Электропривод машин непрерывного литья заготовок. М.: Металлургия, 1987. 279 с.
2. Материалы научно-технического семинара «Прогрессивные методы непрерывной разливки стали и сплавов», 18-19 июня 1996 г., Решение НТС, К.: ФТИМС, 1996. 15с.
3. Хорошилов О.Н. Процесс горизонтального непрерывного литья медных сплавов с вынужденным кратковременным реверсивным движением заготовок повышенного качества в неподвижном кристаллизаторе: Автореф. дис. докт. техн. наук. Днепропетровск, 2013. 32 с.
4. Наумик В.В. Разработка оптимального режима прерывистой вытяжки при получении

качественных цельнолитых заготовок из оловянной бронзы / Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні // Запоріжжя: Видавництво ЗНТУ, 2010. № 1. С. 99 – 103.

5. Бреславский Д.В., Метелев В.А., Морачковский О.К., Татарина О.А. Расчеты динамической ползучести и повреждаемости элементов конструкций из анизотропных материалов // Вісник НТУ «ХП» Динаміка і міцність машин. 2013. № 58. С. 23-31.

6. Патент Украины 28346, 10.12.2007. Хорошилов О.Н., Лысенко В.В., Мараховский М.Б., Трохин М.В., Кипенский А.В. Машина непрерывного литья. // Патент на полезную модель Украины u200707083.2007.Бюл. № 20.

7. Пономаренко. О.И., Бреславский Д.В., Кипенский А.В., Хорошилов О.Н. Непрерывное литье заготовок без повреждений // Оборудование и инструмент для профессионалов. Харьков: ИИД «ЦентрИнформ», 2010. № 10. С. 48-50.

8. Хорошилов О.Н., Кипенский А.В., Лысенко В.В. Мараховский М.Б., Трохин М.В., Куличенко В.В., Бабичева И.И. Горизонтальная машина непрерывного литья с автоматизированным безредукторным электроприводом на базе двигателя с катящимся ротором // Вісник Національного технічного університету «ХП». 2008. № 30. С. 175-178.

9. Долбня В.Т., Кипенский А.В., Кубышкина Н.И. Использование графоаналитического метода для синтеза на координатной плоскости регулировочных характеристик полупроводниковых преобразователей электроэнергии // Электротехника. М.: ЗАО «Знак», 2004. № 6. С. 45-49.

Khoroshilov O.N., Kipensky A.V.

ANALYSIS OF QUALITY OF THE CONTINUOUS CASTING BILLET COPPER ALLOYS BY GRAPHIC-ANALYSIS METHOD

On the enterprises of machine - building complex widely apply the machines of the continuous casting for the production of billet copper alloys by a diameter 0,03...0,06 m. For the last decade the tendency of increase of requirement is in purveyances of billet on 3,0...5,0%. However presently, by virtue of out-of-date base technology of process of the continuous casting billet, the increase of the productivity of machines of the continuous casting results in worsening of quality of billet. One of major indexes of quality is durability of billet. Improving quality of billet is possible by the change of sequence of technological operations of process of the continuous casting. The quantitative value of indexes of quality is related to the parameter of damage, got on the basis of theory of continuum damage.

During researches determined by a graphic-analytical method dynamics of change of quality of preparation depending on basic and advanced technological process with a constant productivity of the car of continuous molding. It is established that when using advanced technological process increase of frequency of the movement of preparation in the range of 0,0417 ... 0,125 Hz in combination with the reversive movement of preparation during overcoming of friction force of rest allow to raise strength characteristics of preparations from 436 to 450 MPas. It in turn will allow with the set productivity of the car of continuous molding to increase quality of preparations.

Key words: copper alloys, billet, damage, durability at a test on tension, graphic-analysis method.