

В магниевых сплавах низкие скорости диффузионных процессов приводят в условиях неравновесной кристаллизации к сильному развитию дендритной ликвации (даже при малых скоростях охлаждения при затвердевании).

Дендритная ликвация способствует снижению механических свойств и технологической пластичности слитков. Поэтому перед деформацией слитки необходимо подвергать гомогенизирующему отжигу [2], после которого все еще видны дендриты (рис. 7).

Таким образом, проведенное опытно-промышленное изготовление штамповок из сплава ZK60A с применением редуцирования показало невозможность получения стабильных качественных штамповок из-за сложности оптимизации технологии гомогенизации исходного металла.

Анализируя приведенные результаты, можно сделать вывод о возможности использования сплава ZK60A для изготовления крупногабаритных штамповок вместо MA14, так как галеты из сплава ZK60A имеют более высокие значения прочностных свойств,

и целесообразности исключения операции редуцирования.

Библиографические ссылки

1. Оптимизация литой структуры сплава системы Mg-Zn-Zr перед горячей деформацией / Т. А. Богданова, Г. А. Меркулова, А. А. Перебоева и др. // Вестник СибГАУ. 2011. Вып. 2 (35). С. 148–153.
2. Doan J. P., Ansel G. Metals Technology. 1946. Vol. 13. Dec.
3. Bhan S., Lal A. The Mg-Zn-Zr System // Journal of Phase Equilibria. 1993. Vol. 14. № 5. P. 634.
4. Морозова Г. И., Мухина И. Ю. Наноструктурное упрочнение литейных магниевых сплавов системы Mg-Zn-Zr // Металловедение и термическая обработка металлов. 2011. № 1. С. 3–7.
5. Волкова Е. Ф., Исходжанова И. В., Тарасенко Л. В. Структурные изменения в магниевом сплаве MA14 под воздействием технологических факторов // Металловедение и термическая обработка металлов. 2010. № 12. С. 19–23.

T. A. Bogdanova, G. A. Merkulova, Yu. V. Gorokhov, N. Yu. Skorokhodova, S. V. Chernov

SELECTING AN ALLOY OF SYSTEM MG-ZN-ZR AND OPTIMIZING BLANK FABRICATION FOR FORGING

The structure and mechanical properties of alloys ZK60A and MA14 of the system Mg-Zn-Zr after casting, homogenization and deformation were studied. It was suggested to change alloy MA14 to ZK60A for large-sized stampings. The possibility to exclude the operation of reduction was shown.

Keywords: magnesium alloy, structure, mechanical properties, casting, homogenizing annealing, deformation.

© Богданова Т. А., Меркулова Г. А., Горохов Ю. В., Скороходова Н. Ю., Чернов С. В., 2012

УДК 621.791.72

В. Я. Браверман, В. С. Белозерцев, Т. Г. Вейсвер

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ КОНТРОЛЯ ПРОПЛАВЛЕНИЯ ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКЕ*

Рассмотрена возможность повышения точности контроля проплавления путем выбора оптимальной амплитуды поискового сигнала при электронно-лучевой сварке.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, рентгеновское излучение, глубина проплавления, спектр излучения.

В настоящее время вопросы стабилизации заданной глубины проплавления при электронно-лучевой сварке (ЭЛС) остаются актуальными, особенно на заключительных этапах сборки ответственных узлов. Мы уже рассматривали способ контроля и стабилизации глубины проплавления по рентгеновскому излучению, регистрируемому со стороны ввода электронного луча [1]. Способ основан на определении положения максимума интенсивности рентгеновского излучения, соответствующего текущей глубине проплавления при заданных режимах ЭЛС (рис. 1). Определение максимума интенсивности осуществляется коллимированным рентгеновским датчиком на основе кристалла NaI(Tl).

На датчик попадает часть рентгеновского излучения $J_d(z)$ в пределах, ограниченных шириной коллиматора Δ , величина которой по оси z составляет $\Delta/\sin\varphi$ и определяется выражением

$$J_d(\varepsilon_z) = J_{\max} \int_{-\frac{\Delta}{2\sin\varphi}}^{\frac{\Delta}{2\sin\varphi}} e^{-0,4(z-\varepsilon_z)^2} dz, \quad (1)$$

где $e^{-0,4(z-\varepsilon_z)^2}$ – плотность распределения рентгеновского излучения по оси z ; ε_z – смещение пятна нагрева относительно заданной глубины проплавления.

*Работа выполнена при финансовой поддержке аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы» (код проекта 2.1.2/9274).

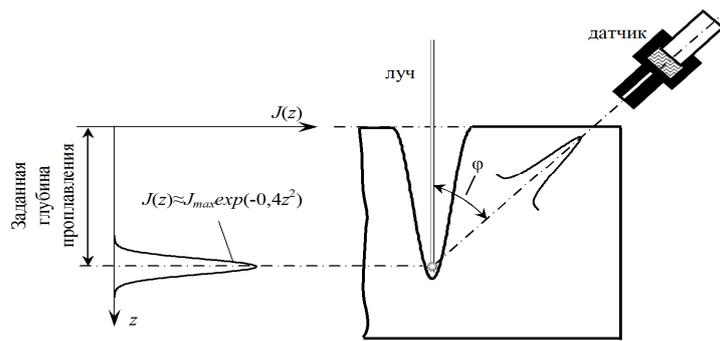


Рис. 1. Распределение интенсивности рентгеновского излучения по глубине канала проплавления (а) и схема регистрации излучения (б)

Представим ε_z в виде

$$\varepsilon_z = \varepsilon_{z0} + \varepsilon_{zm} \sin \alpha, \quad (2)$$

где ε_{z0} – постоянная составляющая смещения пятна нагрева относительно заданной глубины проплавления; ε_{zm} – амплитуда переменной составляющей смещения пятна нагрева относительно заданной глубины проплавления; $\alpha = \omega t$; ω = частота переменной составляющей; t – время.

Представление (2) отражает тот факт, что в положение пятна нагрева введено поисковое движение с частотой ω и амплитудой ε_{zm} . Это может быть реализовано, например, введением переменной составляющей в ток электронного сварочного луча или колебаниями коллиматора относительно проекции пятна нагрева.

При подстановке выражения (2) в (1) последнее может быть представлено рядом Фурье в тригонометрической форме:

$$J_d(\varepsilon_{z0}) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos \alpha + b_k \sin \alpha),$$

где a_k, b_k – коэффициенты ряда:

$$a_k = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \left[J_{\max} \int_{-\frac{\Delta}{2 \sin \varphi}}^{\frac{\Delta}{2 \sin \varphi}} e^{-0,4(z - \varepsilon_{z0} - \varepsilon_{zm} \sin \alpha)^2} dz \right] \cos k \alpha d \alpha; \quad (3)$$

$$b_k = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \left[J_{\max} \int_{-\frac{\Delta}{2 \sin \varphi}}^{\frac{\Delta}{2 \sin \varphi}} e^{-0,4(z - \varepsilon_{z0} - \varepsilon_{zm} \sin \alpha)^2} dz \right] \sin k \alpha d \alpha. \quad (4)$$

Анализ приведенных соотношений свидетельствует о том, что при наличии в положении пятна нагрева поискового движения по глубине канала проплавления спектральный состав рентгеновского излучения (РИ) дополняется составляющими с частотами, кратными частоте поискового движения и амплитудами, находящимися в определенной зависимости от положения пятна нагрева относительно заданной глубины проплавления.

Так амплитуды синусоидальных составляющих b_k с частотами $(2n + 1)\omega$, где $n = 0, 1, \dots$, пропорциональны в некоторых пределах смещению пятна нагрева относительно заданной глубины проплавления (положения коллиматора). Они равны нулю при отсут-

ствии смещения и меняют знак при изменении направления смещения пятна нагрева относительно заданного положения (рис. 2). Изменение знака свидетельствует об изменении фазы колебаний данной составляющей на 180° .

Характер зависимостей этих составляющих предполагает очевидный простой способ получения информации о глубине проплавления, заключающийся, например, в синхронном детектировании сигнала датчика рентгеновского излучения, т. е. выделении составляющей с частотой ω и использовании ее для управления параметрами ЭЛС (током луча или током фокусирующей системы), от которых зависит глубина проплавления.

Если положение пятна нагрева совпадает с осью рентгеновского датчика, то амплитуды косинусоидальных составляющих a_2, a_4, \dots (четные гармоники) максимальны (рис. 3).

Составляющая с двойной частотой поискового движения a_2 может использоваться, например, для определения амплитуды поискового движения, при которой обеспечивается наибольшая чувствительность способа. Так, из формулы (3) можно определить зависимость a_2 от ε_{zm} при $\varepsilon_{z0} = 0$:

$$a_2(\varepsilon_{zm}) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \left[J_{\max} \int_{-\frac{0,3}{2 \sin \varphi}}^{\frac{0,3}{2 \sin \varphi}} e^{-0,4(z - \varepsilon_{zm} \sin \alpha)^2} dz \right] \cos 2 \alpha d \alpha. \quad (5)$$

График зависимости (5) показывает, что максимальная чувствительность может быть достигнута при амплитуде поискового движения, составляющей 2–3 % от глубины проплавления (рис. 4).

Влияние амплитуды поискового движения на зависимость амплитуды b_1 от положения ε_{z0} пятна нагрева относительно заданной глубины проплавления представлено на рис. 5. Зависимости рассчитаны в соответствии с выражением:

$$b_1(\varepsilon_{z0}) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \left[J_{\max} \int_{-\frac{0,3}{2 \sin \varphi}}^{\frac{0,3}{2 \sin \varphi}} e^{-0,4(z - \varepsilon_{z0} - \varepsilon_{zm} \sin \alpha)^2} dz \right] \sin \alpha d \alpha$$

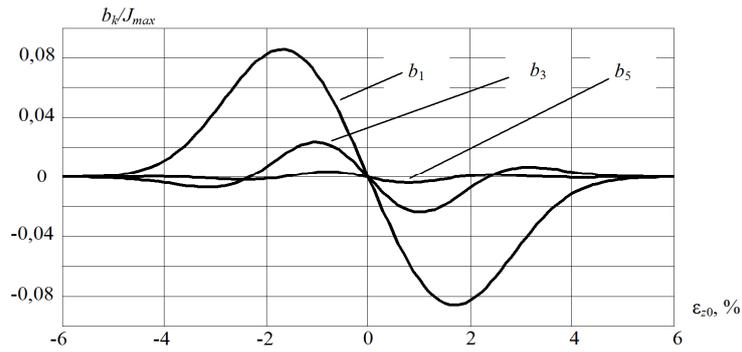


Рис. 2. Зависимости амплитуд синусоидальных b_k составляющих от смещения пятна нагрева относительно заданной глубины проплавления: $\Delta = 0,1$ мм; $\varphi = 45^\circ$

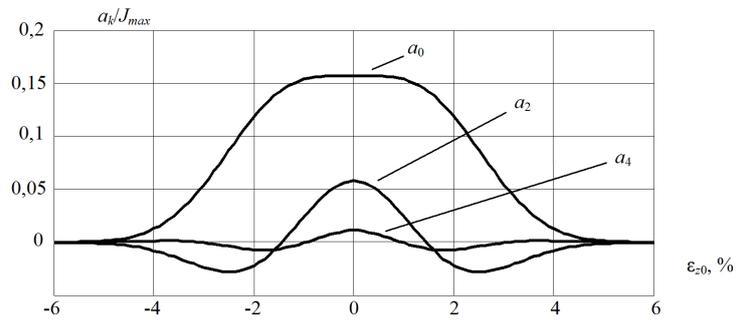


Рис. 3. Зависимости амплитуд косинусоидальных составляющих a_k от смещения пятна нагрева относительно заданной глубины проплавления: $\Delta = 0,1$ мм; $\varphi = 45^\circ$

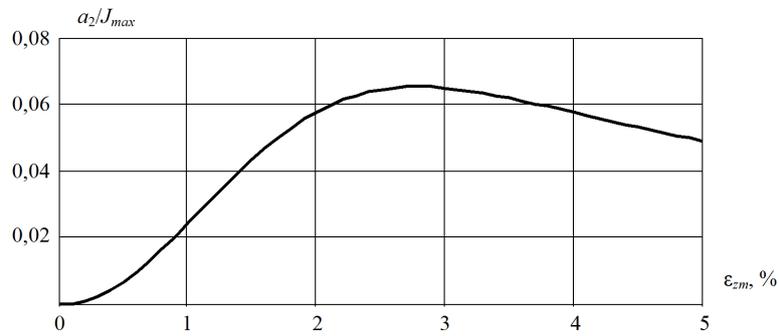


Рис. 4. Зависимость амплитуды a_2 от амплитуды поискового движения ϵ_{zm} .

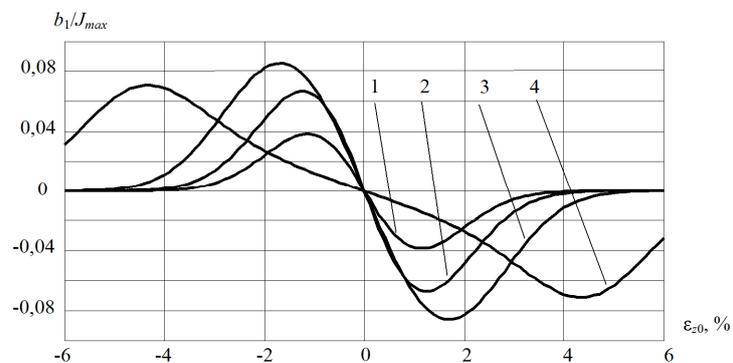


Рис. 5. Зависимости амплитуды b_1 от смещения пятна нагрева относительно заданной глубины проплавления (30 мм) при различной амплитуде ϵ_{zm} (в процентах от глубины проплавления):
 1 - $\epsilon_{zm} = 0,5$; 2 - $\epsilon_{zm} = 1$; 3 - $\epsilon_{zm} = 2$; 4 - $\epsilon_{zm} = 5$

Из графиков видно, что с увеличением амплитуды поискового движения до определенного значения ($\varepsilon_{zm} = 2$) увеличивается коэффициент преобразования и область линейности характеристики (кривые 1–3). Дальнейшее увеличение амплитуды ведет к уменьшению коэффициента преобразования b_1/ε_{z0} (кривая 4), что подтверждается экстремальной зависимостью амплитуды a_2 от амплитуды ε_{zm} поискового движения (рис. 4).

Представляет интерес зависимость рассмотренных характеристик от ширины коллиматора. На рис. 6 представлено семейство характеристик $b_1(\varepsilon_{z0})$ при различных Δ и ε_{zm} , рассчитанных по формуле:

$$b_1(\varepsilon_{z0}, \Delta, \varepsilon_{zm}) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} J_{\max} \left[\frac{\frac{\Delta}{2\sin\varphi}}{\frac{\Delta}{2\sin\varphi}} e^{-0,4(z-\varepsilon_{z0}-\varepsilon_{zm}\sin\alpha)^2} dz \right] \sin\alpha d\alpha. \quad (6)$$

В широком диапазоне амплитуд поискового движения (0,1–3 % от глубины проплавления) коэффициент преобразования максимален при ширине коллиматора, составляющей 2–3,5 % от глубины проплавления (рис. 6, кривые 4, 5). Так, при глубине проплавления 30 мм приведенные проценты соответствуют амплитуде поискового движения – 0,03–0,9 мм и ширине коллиматора – 0,6–1 мм.

Это подтверждается и характеристиками, полученными решением (6) при подстановке $\varepsilon_{z0} = 0,5$ (введено постоянное смещение пятна нагрева от заданной глубины проплавления) и варьировании амплитудой поискового движения ε_{zm} , и шириной коллиматора Δ (рис. 7). Максимальное значение составляющей рентгеновского излучения b_1 при смещении пятна нагрева на 0,5 % от глубины проплавления достигается в одном случае при $\varepsilon_{zm} \approx 2,5$ % и $\Delta \approx 3$ % от глубины проплавления (рис. 7, а, кривая б), в другом – при $\varepsilon_{zm} \approx 2$ % и $\Delta \approx 3$ %.

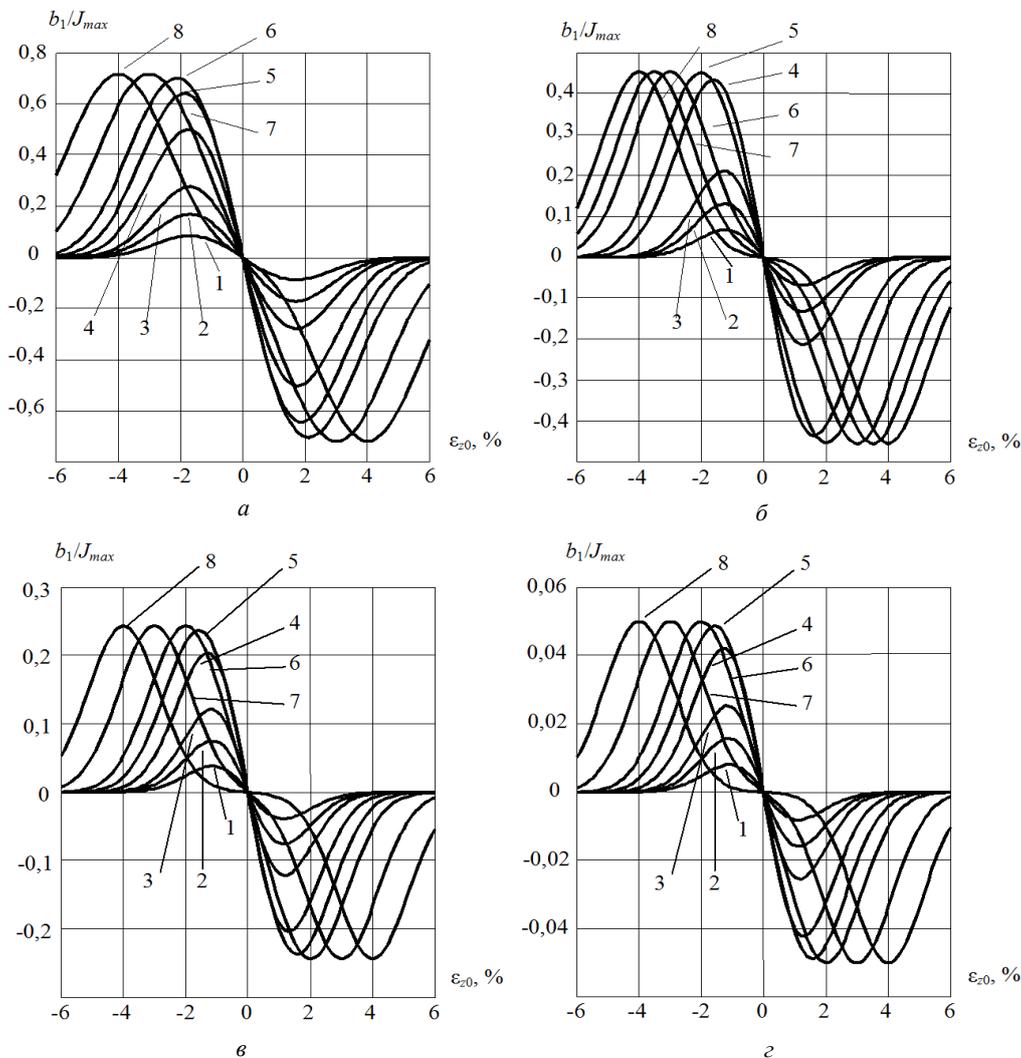


Рис. 6. Графики зависимости амплитуды b_1 от смещения пятна нагрева относительно заданной глубины проплавления при различных амплитудах ε_{zm} поискового движения и различной ширине Δ коллиматора рентгеновского датчика:

$a - \varepsilon_{zm} = 2$; $б - \varepsilon_{zm} = 1$; $в - \varepsilon_{zm} = 0,5$; $г - \varepsilon_{zm} = 0,1$; $1 - \Delta = 0,3$; $2 - \Delta = 0,6$; $3 - \Delta = 1$; $4 - \Delta = 2$; $5 - \Delta = 3$; $6 - \Delta = 4$; $7 - \Delta = 6$; $8 - \Delta = 8$ (ε_{zm} и Δ – в процентах от глубины проплавления)

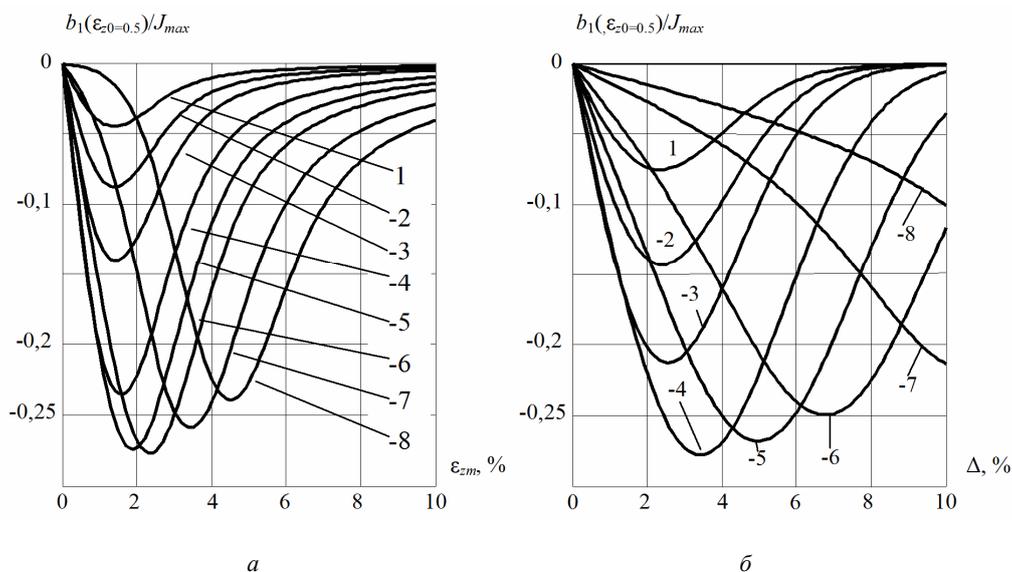


Рис. 7. Зависимость $b_1(0,5)$ от амплитуды ε_{zm} поискового движения при различной ширине коллиматора Δ (а) и от ширины коллиматора Δ при различной амплитуде ε_{zm} поискового движения (б):
 1 – $\Delta = \varepsilon_{zm} = 0,3$; 2 – $\Delta = \varepsilon_{zm} = 0,6$; 3 – $\Delta = \varepsilon_{zm} = 1$; 4 – $\Delta = \varepsilon_{zm} = 2$; 5 – $\Delta = \varepsilon_{zm} = 3$; 6 – $\Delta = \varepsilon_{zm} = 4$; 7 – $\Delta = \varepsilon_{zm} = 6$; 8 – $\Delta = \varepsilon_{zm} = 8$

Результаты аналитических исследований использованы при технической реализации устройств стабилизации глубины проплавления, внедряемых в технологические комплексы ЭЛС ряда предприятий, что подтверждает возможность практического применения математической модели рентгеновского датчика глубины проплавления.

Таким образом, введение поискового движения приводит к появлению в спектре рентгеновского излучения гармонических составляющих, несущих информацию о глубине проплавления; составляющая с двойной частотой может использоваться для определения амплитуды поискового движения при которой

обеспечивается наибольшая чувствительность способа; полученные соотношения позволяют производить анализ информационных сигналов для определения условий получения наибольшей чувствительности датчика при оптимальной ширине коллиматора.

Библиографические ссылки

1. Браверман В. Я., Белозерцев В. С., Вейсвер Т. Г. Контроль глубины проплавления по интенсивности рентгеновского излучения при электронно-лучевой сварке // Вестник СибГАУ. 2010. Вып. 6(32). С. 116–119.

V. Ya. Braverman, V. S. Belozertcev, T. G. Veysver

ACCURACY IMPROVEMENT OF MELTING CONTROL AT THE ELECTRON BEAM WELDING PROCESS

The authors consider the capability of accuracy improvement of melting control at the electron beam welding process, due to optimal choice of scanning signal magnitude.

Keywords: electron beam welding, x-ray radiation, weld penetration, radiation spectrum.

© Браверман В. Я., Белозерцев В. С., Вейсвер Т. Г., 2012