

## КОНТРОЛЬ МЕХАНИЧЕСКОЙ АНИЗОТРОПИИ ЛИСТОВОГО ПРОКАТА НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ ПО ГРАДИЕНТУ ПОЛЯ ОСТАТОЧНОЙ НАМАГНИЧЕННОСТИ

**Счастный А.С., Осипов А.А.**

*Институт прикладной физики НАН Беларуси  
Минск, Республика Беларусь*

Использование листового проката низкоуглеродистых сталей для холодной штамповки регламентирует ГОСТ 9045-93 [1]. В нем для проката по способности к вытяжке приводятся требования по механическим свойствам: пределу текучести, временному сопротивлению, относительному удлинению, твердости и глубине сферической лунки (ГОСТ 10510). Однако, как отмечается в [2], эти параметры не обеспечивают надежной штампуемости листа на производстве, поэтому ГОСТ 9045-93 [1] допускает изготовление проката без механических испытаний, если он штампуются у потребителя. Разрешается использование статистических и неразрушающих методов контроля.

Поэтому актуальной остается задача по разработке методов и средств неразрушающего контроля, которые чувствительны к изменению свойств листа при прокатке и гарантируют пригодность его к штамповке [3]. Одним из них, который получил широкое распространение на металлургических и машиностроительных заводах, является магнитный метод [3-6], использующий связь магнитных свойств со структурным состоянием материала.

Вопросам штампуемости металла при разной степени вытяжки изделий посвящено большое число исследований [2, 7-9]. Поскольку штампуемость зависит от свойств металла, используемой обработки и требуемой категории вытяжки изделия, то разработаны и разрабатываются разнообразные показатели штампуемости [2, 10].

В ряде случаев используют коэффициент механической анизотропии [2, 3, 7]

$$R_{\varphi} = \frac{\ln(b/b_0)}{\ln(t/t_0)}, \quad (1)$$

где  $b$  и  $b_0$  – текущая и первоначальная ширина,  $t$  и  $t_0$  – текущая и первоначальная толщина образца,  $\varphi$  – угол между направлением, в котором вырезался образец для механических испытаний, и прокаткой.

Механические измерения проводят на участке равномерной деформации при испытаниях на растяжение. Так, согласно результатам работы [8], на предельный коэффициент вытяжки существенно влияет коэффициент нормальной анизотропии, а не показатель деформационного упрочнения.

На практике используется как коэффициент

механической анизотропии или их комбинация в конкретном направлении ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  и ряду других), так и некоторое среднее значение, причем вариантов усреднения несколько [7].

С использованием результатов механических испытаний нами вычислялся коэффициент нормальной анизотропии по формуле

$$R_n = 0,25(R_0 + 2R_{45} + R_{90}), \quad (2)$$

где  $R_0$ ,  $R_{45}$ ,  $R_{90}$  – значения  $R_{\varphi}$  в направлениях  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  и  $90^\circ$ .

Объектом исследований являлись образцы листового проката, которые предоставлены комбинатом FQZ (Германия). Толщина проката 0,8 мм, размеры образцов  $1000 \times 1000$  мм<sup>2</sup>. Были проведены механические испытания на соседних участках листового проката, где вырезались пластины в трех направлениях относительно прокатки. Для каждого из этих направлений при испытаниях на растяжение измерялись размеры  $b$ ,  $b_0$ ,  $t$  и  $t_0$ , а величина коэффициента механической анизотропии  $R_{\varphi}$  вычислялась по формуле (1).

Для уменьшения влияния на результаты магнитных измерений неоднородности свойств листового проката (механических и магнитных) проводился отбор образцов исходя из измерений в эквивалентных областях листов [11].

При измерении магнитной анизотропии образцов листового проката в каждом из направлений создавалось магнитное поле в плоскости листа. Направленное магнитное поле формировалось двумя встречно включенными прямоугольными плоскими катушками с размерами  $210 \times 55$  мм<sup>2</sup>, оси которых устанавливались нормально к поверхности листа без зазора. Расстояние между осями катушек 141 мм. Намагничивание осуществлялось одним однополярным импульсным магнитным полем, направленным вдоль и поперек направления прокатки. Величина импульсного магнитного поля на торцах прямоугольных катушек составляла  $2 \cdot 10^5$ ,  $7 \cdot 10^4$  и  $3,5 \cdot 10^4$  А/м. Длительность намагничивающего импульса 15 мс.

Для измерений был выбран градиентометр, который располагался тангенциально на листе между катушками вдоль направления намагничивающего поля. Информативными параметрами являлись остаточные тангенциальные поля при намагничивании вдоль и поперек направления прокатки.

По результатам измерений строились зависимости величины градиента напряженности

магнитного поля от рассчитанного значения коэффициента нормальной анизотропии  $R_n$  (2). По экспериментальным данным строились линейные модели.

Из полученных данных следует, что наибольший коэффициент корреляции имеет место при намагничивании и измерении перпендикулярно направлению прокатки и равен 0,73 для наибольшей величины намагничивающего поля ( $2 \cdot 10^5$  А/м). С уменьшением величины поля значение коэффициента корреляции падает, соответственно, до 0,66 и 0,61.

При намагничивании и измерении вдоль направления прокатки полученная зависимость от величины максимального импульсного поля обратная. Наибольший коэффициент корреляции наблюдается при наименьшей величине намагничивающего поля ( $3,5 \cdot 10^4$  А/м) и равен 0,62, а с увеличением поля значение коэффициента корреляции падает, соответственно, до 0,5 ( $7 \cdot 10^4$  А/м) и 0,44 ( $2 \cdot 10^5$  А/м).

Такой результат выявляет сложный характер зависимости между формированием магнитной и механической анизотропии. Причем механическая анизотропия может оказывать как отрицательное, так и положительное [7] влияние на пригодность материала к штамповке в производственных условиях. Данное обстоятельство налагает дополнительные требования к приборам неразрушающего контроля, особенно на стадии поиска корреляции и при внедрении.

Более высокие корреляции были выявлены между величиной градиента напряженности остаточного магнитного поля и коэффициентами механической анизотропии  $R_\phi$ , вычисленными по формуле (1).

Найдено, что наибольший коэффициент корреляции получается для коэффициентов механической анизотропии  $R_{90}$ , причем наибольшее значение получается при намагничивании поперек прокатки и равно 0,82.

Несколько ниже коэффициенты корреляции для максимального импульсного намагничивающего поля ( $2 \cdot 10^5$  А/м) для измерения поперек и вдоль прокатки: 0,76 и 0,78. Для других значений максимального поля и направлений измерения градиента напряженности остаточного магнитного поля коэффициенты корреляции для  $R_{90}$  ниже, но не меньше 0,58. Чувствительность к конкретной компоненте может оказаться полезной на практике.

Можно заключить, что значения коэффициентов нормальной анизотропии  $R_n$  (а также коэффициентов анизотропии  $R_{90}$ ) листового проката низкоуглеродистой стали возможно контролировать по величине градиента напряженности остаточного магнитного поля в центре между прямоугольными намагничивающими катуш-

ками при намагничивании импульсным полем.

1. ГОСТ 9045-93: Прокат тонколистовой холоднокатаный из низкоуглеродистой качественной стали для холодной штамповки. Технические условия. – Введ. 01.01.97. – Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1996. – 18 с.
2. Востриков, А.А. Новый показатель штампуемости автолиста / А.А.Востриков, В.В. Гайдук, Г.Э.Аркулис // Сталь. – 1982. – № 1. – С. 67-71.
3. Матюк, В.Ф. Состояние неразрушающего контроля штампуемости листового проката сталей / В.Ф.Матюк // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2012. – № 3. – С. 15-42.
4. Мельгуй, М.А. Магнитный контроль механических свойств сталей / М.А.Мельгуй. – Минск: Наука и техника, 1980. – 184 с.
5. Михеев, М.Н.. Связь магнитных свойств со структурным состоянием вещества – физическая основа магнитного структурного анализа (обзор) / М.Н.Михеев, Э.С.Горкунов // Дефектоскопия. – 1981. – № 8. – С. 5–21.
6. Михеев, М.Н. Магнитные методы неразрушающего контроля структурного состояния и прочностных характеристик термически обработанных изделий (обзор) / М.Н.Михеев, Э.С.Горкунов // Дефектоскопия. – 1985. – № 3. – С. 3-21.
7. Шевелев, В.В. Анизотропия листовых материалов и ее влияние на вытяжку / В.В.Шевелев, С.П.Яковлев – М.: Машиностроение, 1972. – 133 с.
8. Аверкиев, А.Ю. Влияние нормальной анизотропии и упрочнения на предельный коэффициент вытяжки / А.Ю.Аверкиев // Кузнечно-штамповочное производство. – 1996. – № 11. – С. 14-18.
9. Аверкиев, А.Ю. Методы оценки штампуемости листового металла / А.Ю.Аверкиев – М.: Машиностроение, 1985. – 176 с.
10. Востриков, А.А. Оценка штампуемости холоднокатаных листов из стали 08Ю по комплексному показателю  $F$  / А.А.Востриков, Т.В. Баклушина, Н.Л.Яценко, И.Ю.Надеина // Сталь. – 1989. – № 8. – С. 51-55.
11. Счастный, А.С. Исследование возможности контроля коэффициента нормальной анизотропии листового проката стали импульсным магнитным методом / А.С.Счастный, А.А.Осипов // Материалы 5-ей международной научно-технической конференции и выставки «Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов». Могилев, 24-25 сентября 2014 г.