

УДК 621.771.2.67

Федоринов М. В.
Грибков Э. П.
Матвеев И. А.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАНЕСЕНИЯ ТИСНЕНИЯ НА ПОВЕРХНОСТЬ ПОЛОСЫ МЕТОДАМИ ПРОКАТКИ

Нанесение рифления на поверхность полосы методами прокатки позволяет получать изделия с декоративными и функциональными покрытиями, позволяющими повысить эксплуатационные характеристики готовых изделий.

В работе [1] рассмотрен способ нанесения тиснения на поверхность полосы при помощи электроэрозии, установлена связь между шероховатостью поверхности валка и силой пропускаемого тока на глубину отпечатка. В работе [2] произведен сравнительный анализ технологий нанесения тиснения методами прокатки и прессования. Исследовано влияние толщины листа на глубину отпечатка. Авторами [3] исследовано влияние тиснения на прочностные характеристики листов, было установлено, что на растягивающую нагрузку тисненные листы работают хуже, чем плоские, а на изгиб – лучше, причем с увеличением глубины тиснения данный эффект увеличивается. В работе [4] установлено положительное влияние тиснения на поверхности полос на процесс их правки и дрессировки, уменьшая при этом энергосиловые параметры и износ рабочего инструмента правильных машин и дрессировочной клетки. Несмотря на наличие ряда исследований, недостаточно полно изучены вопросы определения напряженно-деформированного состояния металла при тиснении, что делает актуальным дальнейшее развитие методов расчета, позволяющих наиболее полно учесть влияние технологических параметров процесса.

Целью работы является разработка математической модели процесса тиснения полос методами прокатки и на её основе методики по автоматизированному проектированию соответствующего механического оборудования.

В самом общем случае для условий реализации процесса нанесения тиснения на поверхность полосы являются наличие малых углов захвата и небольшая величина относительного обжатия ($\epsilon < 0,05$). При таких условиях большое влияние на длину зоны контакта и характер изменения контактных напряжений оказывают упругие деформации рабочих валков и полосы [5].

С учетом изложенного выше для разработки методики расчета энергосиловых параметров процесса тиснения могут быть использованы результаты решения двухмерной задачи о сжатии тонкой упруго-пластической полосы между параллельными плитами при касательных контактных напряжениях, пропорциональных сопротивлению чистого сдвига K_{cp} :

$$\tau = 2K_{cp}\mu = mK_{cp}, \quad (1)$$

где $m = 2\mu$ – вспомогательный параметр, используемый при дальнейших расчетах; μ – коэффициент пластического трения.

Длина зоны контакта при тиснении, учитывающая упругую деформацию валков и полосы, может быть определена как:

$$l_c = \sqrt{R(\delta + P(bQ_b))}, \quad (2)$$

где R – радиус рабочих валков; P – величина силы прокатки; b – ширина обрабатываемой полосы.

Упругую постоянную материала рабочих валков Q_b и приведенную величину обжатия δ , являющиеся составными частями уравнения (2), вычисляют по формуле:

$$Q_b = \frac{\pi E_b}{16(1 - \nu_b^2)}; \quad (3)$$

$$\delta = \Delta h + 2\Delta^* + 2\sqrt{(\Delta h + \Delta^*)\Delta^*}, \quad (4)$$

где E_b , ν_b – модуль упругости и коэффициент Пуассона материала рабочих валков; $\Delta h = h_0 - h_1$ – величина абсолютного обжатия полосы; h_0 , h_1 – исходное и конечное для данного прохода значение толщины обрабатываемой полосы.

Изменение толщины полосы в результате разгрузки Δ^* при наличии пластической деформации по всему поперечному сечению полосы определяют, исходя из выражения:

$$\Delta^* = \left(0,75 \frac{K_{cp}}{E_n} \right) A^* h_1, \quad (5)$$

где E – модуль упругости материала полосы;

$$A^* = \sqrt{1 - m^2} + \frac{\arcsin m}{m}.$$

При расчете процесса тиснения предполагают, что полоса деформируется пластически, когда в зоне деформации имеется участок, на котором пластическая деформация проникает через всю толщину обрабатываемой полосы. Отмеченное, в свою очередь, наблюдается при выполнении следующего условия:

$$\frac{\Delta h}{h_0} \geq \frac{0,75 K_{cp}}{E_n} (2 - A^*). \quad (6)$$

Непосредственно протяженность участка нагружения l_1 и разгрузки l_2 , а также протяженность упругой и упруго-пластической деформации l_n в зоне нагружения, могут быть в этом случае определены как:

$$l_1 = \sqrt{(\Delta h + \Delta^*) l_c / \delta}; \quad (7)$$

$$l_2 = \sqrt{\Delta^* l_c / \delta}; \quad (8)$$

$$l_n = \frac{1,5 K_{cp} h_0 l_1}{E_n (\Delta h + \Delta^*)}. \quad (9)$$

Кроме того, для расчета энергосиловых параметров процесса тиснения необходимым является определение протяженности еще двух участков:

$$x_a = \frac{\sigma_0}{2K_{cp}(m/h_0 + 1/l_n)}; \quad (10)$$

$$x_b = \frac{\sigma_1}{2K_{cp}(m/h_1 + 1/l_2)}. \quad (11)$$

а также определение длины участков a и b , определяющих положение точек, в которых нормальное контактное напряжение достигает своего максимального значения:

$$a = \frac{h_0}{h_0 + h_1} l_c + \frac{(\sigma_0 - \sigma_1) h_0 h_1}{2K_{cp} m (h_0 + h_1)}; \quad (12)$$

$$b = \frac{h_1}{h_0 + h_1} l_c + \frac{(\sigma_0 - \sigma_1) h_0 h_1}{2K_{cp} m (h_0 + h_1)}, \quad (13)$$

где σ_1 , σ_0 – напряжения переднего и заднего натяжений полосы.

С учетом количественных оценок основных и вспомогательных параметров, входящих в зависимости (14)–(15), непосредственно величина силы тиснения полосы может быть определена как:

$$P = \frac{b}{2} \left[(2a - l_n)(2K_{cp} - \sigma_0) + (2b - l_2)(2K_{cp} - \sigma_1) + 2K_{cp}m \left(\frac{a^2}{h_0} + \frac{b^2}{h_0} \right) - x_a \left(\frac{2K_{cp}m}{h_0} l_n + 2K_{cp} - \sigma_0 \right) - x_b \left(\frac{2K_{cp}m}{h_1} l_2 + 2K_{cp} - \sigma_1 \right) \right], \quad (14)$$

Для определения момента тиснения необходимо сначала определить удельную энергоемкость процесса:

$$A = \frac{P_{cp} \ln(h_0/h_1)}{j} = \frac{P \ln(h_0/h_1)}{bl_c j}, \quad (15)$$

а затем собственно величину суммарного момента, исходя из условия баланса энергетических затрат:

$$M_{пр} = R \left[P_{cp} b h_1 \ln(h_0/h_1) - \sigma_1 h_1 b + \sigma_0 h_0 b \right], \quad (16)$$

где $P_{cp} = P/(bl_c)$ – среднеинтегральное значение нормальных контактных напряжений; j – показатель плотности материала полосы.

В целом, зависимости (1)–(16) в сочетании с расчетом среднеинтегральной величины удвоенного сопротивления сдвигу, составили полный алгоритм расчета энергосиловых параметров процесса тиснения полос.

Методика проведения экспериментальных исследований заключалась в прокатке полосы в клети дуо, в которой поверхность одного из валков профилированная под необходимый узор тиснения. При проведении исследований определение силы прокатки осуществлялось при помощи кольцевых мездоз аналогово-цифрового преобразователя (АЦП), определение силы натяжения – при помощи динамометра. Результаты замера сил прокатки представлены на рис. 1.

Прокатка с натяжением проводилась следующим образом. В начале прокатывался передний конец полосы без натяжения, при этом сила прокатки составила 8,8 кН, затем были отсоединены приводные шпинделя и заканчивалась прокатка ленты путем приложения натяжения (рис. 2) на уровне 800 Н, сила прокатки при этом составила 9,5 кН. Состояние поверхности лент, полученных после прокатки, представлено на рис. 3.

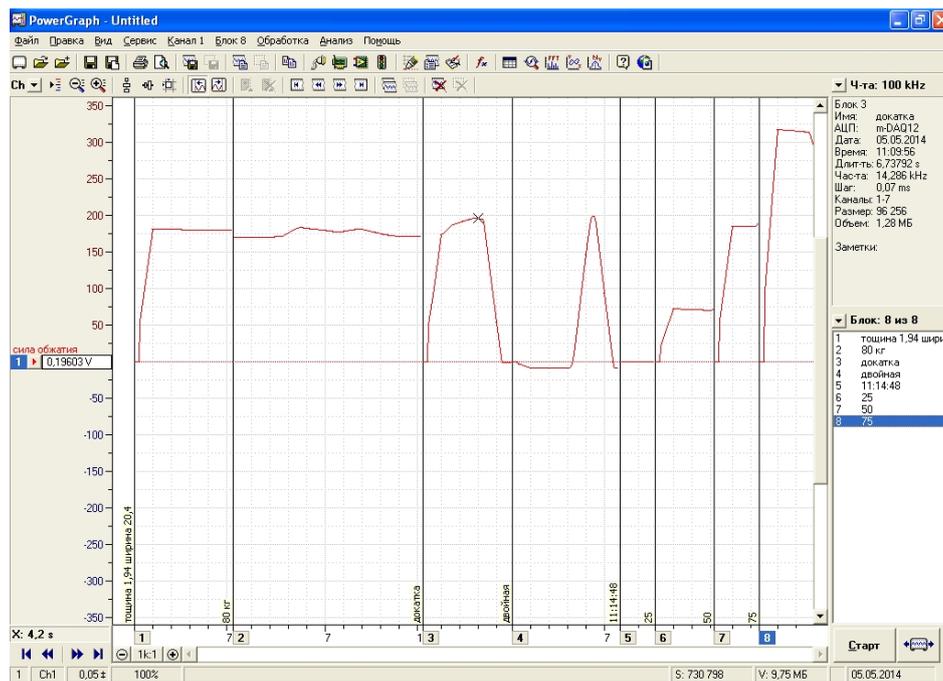


Рис. 1. Результаты записи сигнала от АЦП при проведении экспериментов

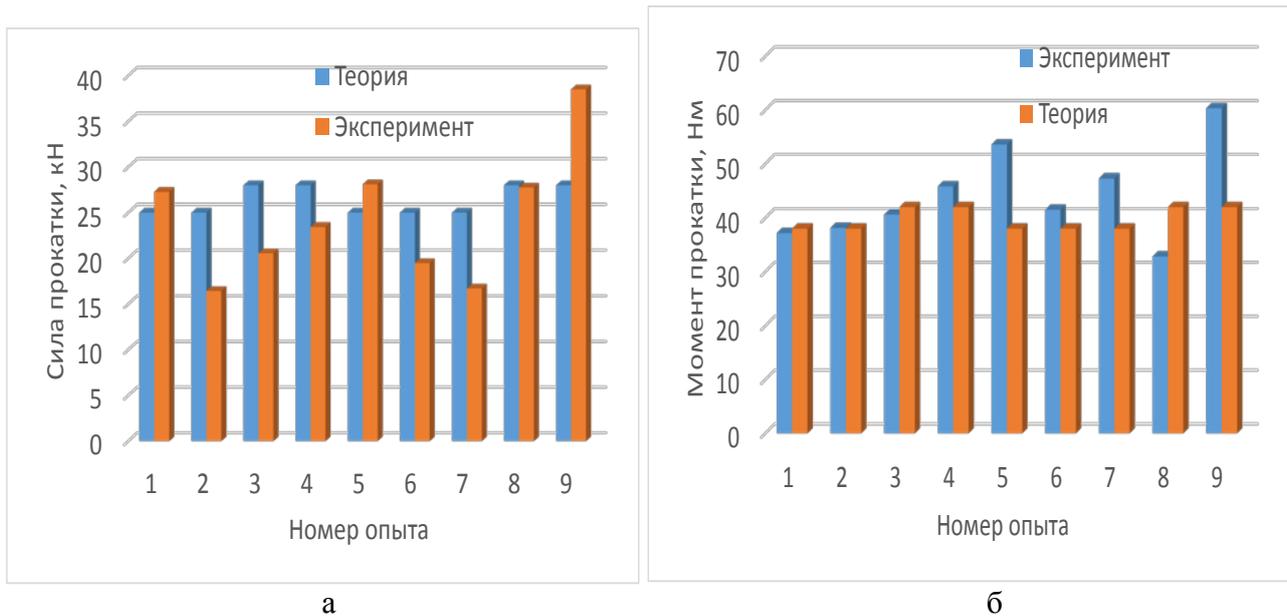


Рис. 2. Прокатка полосы натяжением в холостых валках



Рис. 3. Образцы после прокатки

Сравнение теоретических, полученных при помощи разработанной математической модели, и экспериментальных данных представлено на рис. 4. Анализ полученных зависимостей показывает, что погрешность расчёта силы и момента прокатки не превысила 20%. Данная точность удовлетворяет проектировочным расчетам и подтвердила возможность использования данной модели для проектирования оборудования для тиснения полос.



а

б

Рис. 4. Сравнение теоретических и экспериментальных данных по силе (а) и моментам (б) прокатки при тиснении полос (материал – сталь 08кп; толщина полосы – 0,35...0,56 мм; ширина полосы – 30...45 мм; диаметр валков – 100 мм)

Помимо прогнозирования энергосиловых параметров процесса наибольший интерес представляет автоматизированный расчет оптимальных параметров механического оборудования. Для этого в рамках данной работы были разработаны соответствующие программные средства. В качестве варьируемого параметра был использован диаметр валков, при этом были определены сила и момент прокатки, эквивалентные напряжения в сечении посередине бочки валка и в месте перехода бочки в шейку, а также величины деформаций валка посередине бочек и краям полосы. Результаты расчетов представлены на рис. 5...6.

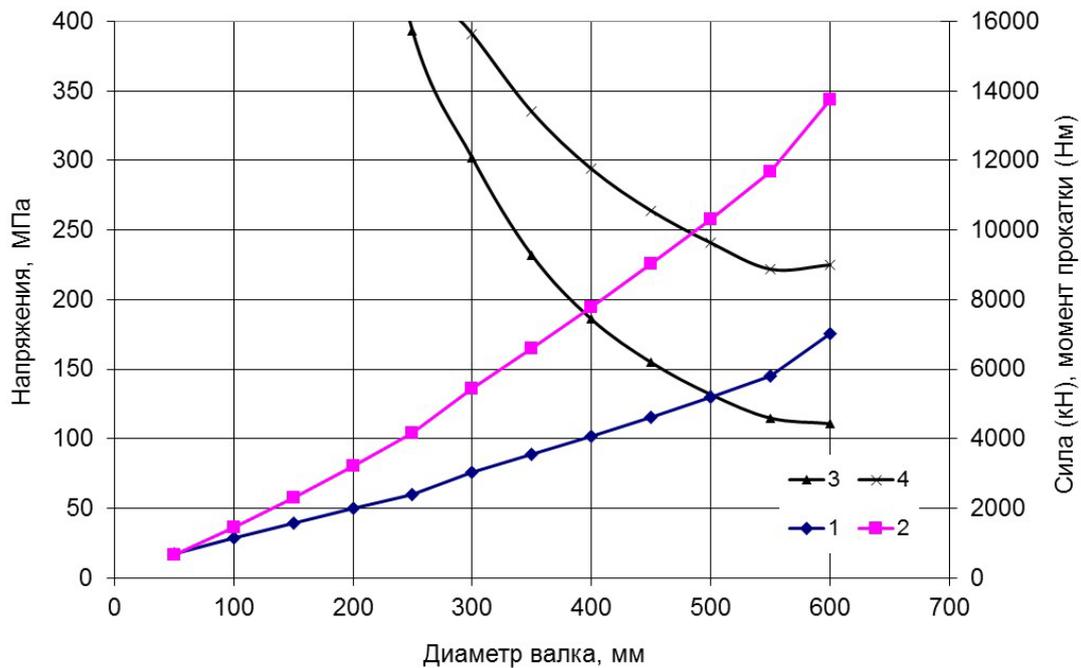


Рис. 5. Зависимость силы (1) и момента (2) прокатки, а также эквивалентных напряжений в сечении посередине бочки валка (3) и в месте перехода бочки валка в шейку (4) от диаметра валка (толщина металла – 1,5 мм; ширина полосы – 1250 мм; материал полосы – сталь 45)

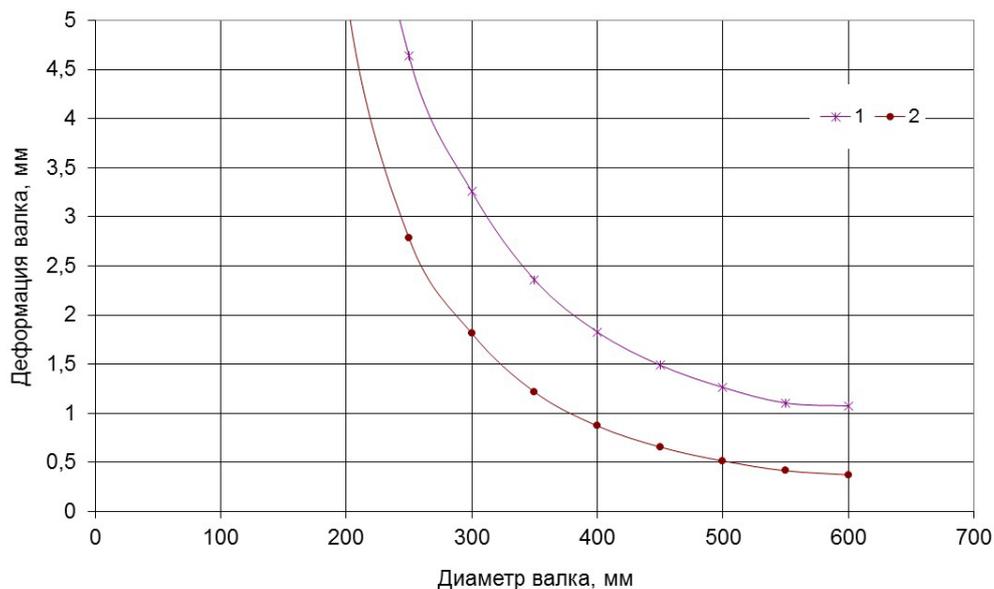


Рис. 6. Зависимость упругих деформаций и разницы деформаций посередине бочки валка (1) и края прокатываемой заготовки (2) от диаметра валка (толщина металла – 1,5 мм; ширина полосы – 1250 мм; материал полосы – сталь 45)

Из анализа представленных зависимостей можно сделать вывод об оптимальном с точки зрения прочностных и деформационных характеристик диаметре бочки валка, который для данных условий реализации процесса составил 500 мм.

ВЫВОДЫ

Разработанная математическая модель процесса тиснения полос методами прокатки подтверждена экспериментальными исследованиями и может быть использована при проектировании нового механического оборудования для реализации данного процесса. Выполнено автоматизированное проектирование оборудования, учитывающее технологические параметры процесса, на основе которых дана рекомендация по геометрическим характеристикам рабочего валка.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kim Soon-Kyung. *A study on the characteristics of electro-discharge texturing for temper mill work roll* / Soon-Kyung Kim, Moon-Kyung Kim, Eon-Chan Jeon // *KSME International Journal*. – January 1998. – Volume 12. – Issue 1. – P. 153–159. – Access mode: <http://link.springer.com/article/10.1007%2F02946543>.
2. Güler H. *Comparison of the Mechanical Properties of Rotary Embossing and Restoration Processes* / H. Güler, R. Özcan // *JOM*. – August 2012. – Volume 64. – Issue 8. – P. 911–915. – Access mode: <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11837-012-0372-7>.
3. Güler H. *Effects of the rotary embossing process on mechanical properties in aluminum alloy 1050 sheet* / H. Güler, R. Özcan // *Metals and Materials International*. – April 2012. – Volume 18. – Issue 2. – P. 225–230. – Access mode: <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs12540-012-2004-8>.
4. *Novel method for obtaining the mechanical and topographic properties of strip within one process step* / V. Diegelmann, G. Zwickel, M. Ullrich, H. Gouveia, U. Weirauch, K. Boguslawsky, A. V. P. Espinoza // *Stahl und eisen*. – 2013. – Vol. 133. – Issue 11. – P. 215–225.
5. Федоринов В. А. *Математическое моделирование напряжений, деформаций и основных показателей качества при прокатке относительно широких листов и полос* : монография / В. А. Федоринов, А. В. Сатонин, Э. П. Грибков. – Краматорск : ДГМА, 2010. – 244 с.

REFERENCES

1. Kim Soon-Kyung. *A study on the characteristics of electro-discharge texturing for temper mill work roll* / Soon-Kyung Kim, Moon-Kyung Kim, Eon-Chan Jeon // *KSME International Journal*. – January 1998. – Volume 12. – Issue 1. – P. 153–159. – Access mode: <http://link.springer.com/article/10.1007%2F02946543>.
2. Güler H. *Comparison of the Mechanical Properties of Rotary Embossing and Restoration Processes* / H. Güler, R. Özcan // *JOM*. – August 2012. – Volume 64. – Issue 8. – P. 911–915. – Access mode: <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11837-012-0372-7>.
3. Güler H. *Effects of the rotary embossing process on mechanical properties in aluminum alloy 1050 sheet* / H. Güler, R. Özcan // *Metals and Materials International*. – April 2012. – Volume 18. – Issue 2. – P. 225–230. – Access mode: <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs12540-012-2004-8>.
4. *Novel method for obtaining the mechanical and topographic properties of strip within one process step* / V. Diegelmann, G. Zwickel, M. Ullrich, H. Gouveia, U. Weirauch, K. Boguslawsky, A. V. P. Espinoza // *Stahl und eisen*. – 2013. – Vol. 133. – Issue 11. – P. 215–225.
5. Fedorin V. A. *Matematicheskoe modelirovanie naprjazhenij, deformacij i osnovnyh pokazatelej kachestva pri prokatke otноситel'no shirokih listov i polos* : monografija / V. A. Fedorin, A. V. Satonin, Je. P. Gribkov. – Krमतаторск : DGMA, 2010. – 244 s.

Федоринов М. В. – канд. техн. наук, доц. ДГМА;
Грибков Э. П. – канд. техн. наук, доц. ДГМА;
Матвеев И. А. – студент ДГМА.

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

E-mail: amm@dgma.donetsk.ua

Статья поступила в редакцию 16.06.2015 г.