УДК 621.929.3
DOI: 10.17277/vestnik.2026.02.pp.321-329

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМНЫХ ПЕРЕМЕННЫХ И КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВАЛКОВЫХ МАШИН НА ЭНЕРГОЗАТРАТЫ И ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА РЕЗИНОВЫХ СМЕСЕЙ ПРИ НЕПРЕРЫВНОМ РЕЖИМЕ ИХ ПЛАСТИКАЦИИ

© М. В. Соколов[1]✉, П. С. Беляев[2], Д. В. Туляков[3]

[1] *Кафедра «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении», msok68@mail.ru;*
[2] *Кафедра «Материалы и технология», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Российская Федерация;*
[3] *ТОГАПОУ «Тамбовский бизнес-колледж», Тамбов, Российская Федерация*

Ключевые слова: межвалковый зазор; пластичность резиновых смесей; скорчинг; суммарная величина сдвига при вальцевании; условная прочность при разрыве; фрикция.

Аннотация: Рассмотрено влияние конструктивных и технологических параметров валковой машины при периодическом и непрерывном режимах пластикации резиновой смеси марки НО-68-1 на показатели ее качества, такие как условная прочность при разрыве, пластичность, скорчинг. Отмечено, что при непрерывном режиме вальцевания резиновой смеси достигаются стабильно лучшие показатели качества за меньшее время пластикации. С целью выбора параметров управления при оптимизации процесса вальцевания и конструкции рабочих органов валковых машин для переработки резиновых смесей в непрерывном режиме их пластикации, установлен характер и вес влияния основных технологических и конструктивных параметров между собой на функции состояния, то есть их корреляция.

Введение

Главными преимуществами непрерывной схемы пластикации перед периодической (внутренние смесители Бенбери) являются: стабильность показателей качества резиновой смеси, то есть нет «истории» состояния резиновой смеси как в отдельных порциях, а, именно, показатели качества метра ленты в начале и в конце смены идентичны, если система вышла на стационарный режим, что в свою очередь критично для массового производства однотипных резинотехнических изделий (**РТИ**). Затраты энергии на единицу продукции в правильно настроенном непрерывном режиме пластикации на 15 – 25 % меньше, чем при периодическом, то есть нет циклов «разгон-остановка», меньше холостых потерь. Также имеется потенциал автоматизации – прямая интеграция с экструдерами, каландрами, линиями вулканизации.

Но при непрерывном режиме пластикации резиновых смесей на валковых машинах могут возникать сложности организации процесса, такие как «прилипа-

ние» смеси к валам из-за неточной геометрии валков, низкой шероховатости их поверхности, наличия градиента температур по длине валка, что необходимо прогнозировать расчетами по математической модели. Неправильный тепловой режим не позволит получить гладкую ленту, а приведет к образованию «рваного блина», который рвется на транспортере. Резина течет как жидкость, но помнит как твердое тело. Это не металл, ее нельзя просто расплавить и отлить. Механохимические процессы при деформации сдвига необратимы. Однажды перегревшаяся смесь уже не восстановится.

В качестве функций состояния принимали такие показатели качества резиновой смеси, как условная прочность при разрыве *fp*; пластичность Пл (показатель качества, зависящий обратно пропорционально от скорчинга [1]) и сдвиг при вальцевании $\gamma_в$ [2], которые в свою очередь зависят от конструктивных и технологических параметров процесса пластикации на валковых машинах по уравнениям математической модели, изложенной в книге [3].

Влияние конструктивных и технологических параметров валковой машины проведено на примере непрерывного режима пластикации резиновой смеси НО-68-1 со следующими теплофизическими и реологическими параметрами: плотность $\rho = 1200$ кг/м^3; теплопроводность $\lambda = 0{,}22$ Вт/(м·°С); теплоемкость $c = 2300$ Дж/(кг·°С); при неизотермическом режиме вальцевания: мера консистенции m_0 = 600 кПа·с^n; индекс течения n = 0,2; начальная температура резиновой смеси на входе $T_{см.вх}$ = 323 К; температура поверхности валков $T_ц$ = 358 К.

Выбор параметров управления проводился по результатам анализа функций состояния, расчет которых осуществлялся с помощью программного обеспечения для ЭВМ [4], разработанного на основе математической модели процесса экструзии резиновых смесей [3].

Исследования с помощью методов имитационного моделирования по оценке влияния режимных переменных (фрикции *f*, частоты вращения валка вальцов *u*) и конструктивных параметров валковой машины (минимального межвалкового зазора $h_{0в}$, диаметра валков $D_в$, длины рабочей части валков $L_в$) на процесс непрерывного вальцевания с учетом качества пластиката (величины сдвига) резиновых смесей показаны на рис. 1 – 8, где приведены зависимости физико-механических показателей от частоты вращения валков при попарно сочетающихся различных значениях величин фрикции *f*, минимального межвалкового зазора $h_{0в}$, а именно:

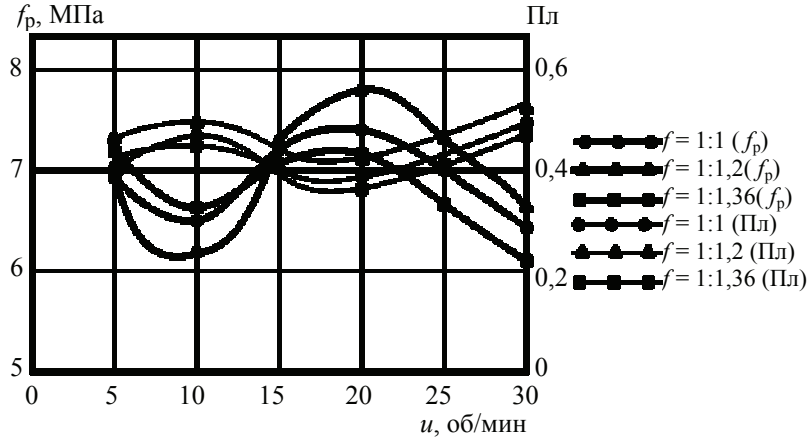

Рис. 1. Зависимости условной прочности при разрыве $f_р$ и пластичности Пл от частоты вращения *u* при $h_{0в}$ = 1,5 мм, различных значениях фрикции *f* и непрерывном режиме работы вальцов

зависимости условной прочности при разрыве $f_р$ и пластичности Пл от частоты вращения u при $h_{0в}$ = 1,5 мм, различных значениях фрикции f и непрерывном режиме работы вальцов; зависимости условной прочности при разрыве $f_р$ и пластичности Пл от частоты вращения u при фрикции f = 1:1,2 при различных значениях межвалкового зазора $h_{0в}$ и непрерывном режиме работы вальцов; зависимости условной прочности при разрыве $f_р$, пластичности Пл и времени вальцевания t от величины сдвига $\gamma_в$ при периодическом и непрерывном режимах работы вальцов; зависимости условной прочности при разрыве $f_р$, пластичности Пл от величины суммарного сдвига $\gamma_в$, полученные на вальцах СМ 80/80 200 (ЭУ2) и промышленных вальцах ЛБ 320/320 550.

Зависимости условной прочности при разрыве $f_р$ и пластичности Пл от частоты вращения u при $h_{0в}$ = 1,5 мм, различных значений фрикции (f = 1:1,1; 1:1,2; 1:1,36) и непрерывном режиме вальцевания резиновой смеси НО-68НТА показаны на рис. 1, из которого видно, что максимальное значение условной прочности при разрыве $f_р$ и нормированное значение пластичности соответствуют фрикции f = 1:1,2 и частоте вращения u = 20 об/мин

На рисунке 2 показаны зависимости предела условной прочности при разрыве $f_р$ и пластичности Пл от частоты вращения u при фрикции f = 1:1,2, различных значениях минимального межвалкового зазора ($h_{0в}$ = 1,0; 1,5; 2 мм) и непрерывном режиме вальцевания резиновой смеси НО-68НТА. Экспериментальные исследования показали, что максимальное значение условной прочности при разрыве $f_р$ и нормированное значение пластичности Пл соответствуют фрикции f = 1:1,2, минимальному межвалковому зазору $h_{0в}$ = 1,5 мм и частоте вращения u = 20 об/мин.

На рисунке 3 представлены зависимости условной прочности при разрыве $f_р$, пластичности Пл и времени вальцевания t от величины сдвига $\gamma_в$ при периодическом и непрерывном режиме работы вальцов на примере резиновой смеси шифра НО-68НТА. Лучшие показатели по прочности наблюдаются при одинаковой величине сдвига, однако при непрерывном процессе время вальцевания примерно в 2 раза меньше, чем при периодическом. Следовательно, производительность увеличивается примерно в 2 раза.

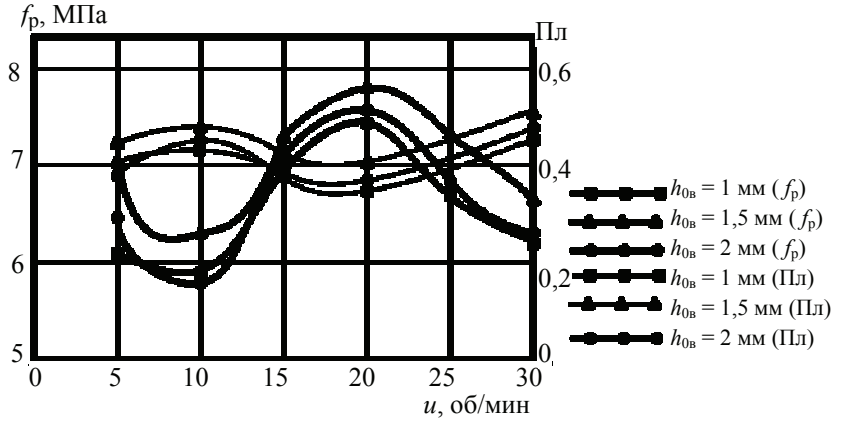

Рис. 2. Зависимости условной прочности при разрыве $f_р$ и пластичности Пл от частоты вращения u при фрикции f = 1:1,2 различных значениях межвалкового зазора $h_{0в}$ и непрерывном режиме работы вальцов

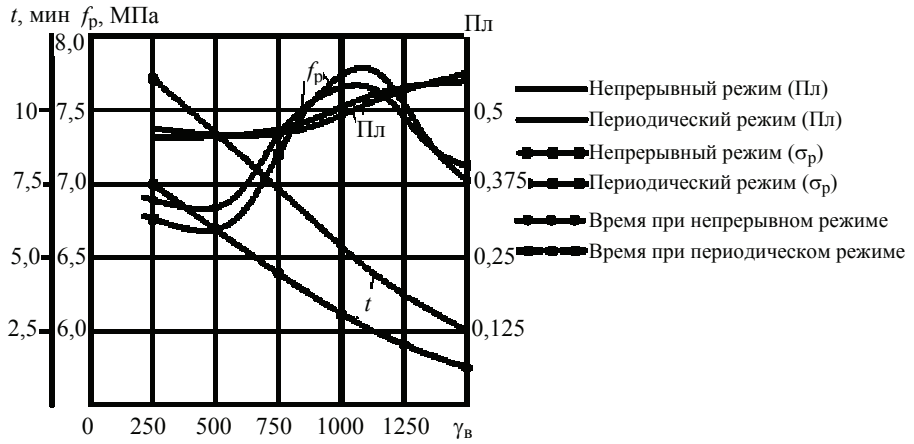

Рис. 3. Зависимости условной прочности при разрыве $f_р$, пластичности Пл и времени вальцевания t от величины сдвига $\gamma_в$ при периодическом и непрерывном режимах работы вальцов

Для проверки влияния суммарной величины сдвига на физико-механические показатели пластиката резиновой смеси шифра НО-68НТА проведены экспериментальные исследования на вальцах с диаметром валков 320 мм и их рабочей длиной 550 мм. После расчета суммарной величины сдвига и обработки экспериментальных данных построены графические зависимости физико-механических показателей пластиката $f_р$, Пл от величины сдвига $\gamma_в$, показанные на рис. 4, в сравнении с такими же зависимостями, полученными на экспериментальной установке ЭУ2.

Наилучшие физико-механические показатели пластиката резиновой смеси наблюдаются при такой же величине сдвига $\gamma_в$, как и при экспериментальных исследованиях на промышленных вальцах СМ 320/320 550 (см. рис. 4). Расхождение между физико-механическими показателями составили не более 9 %.

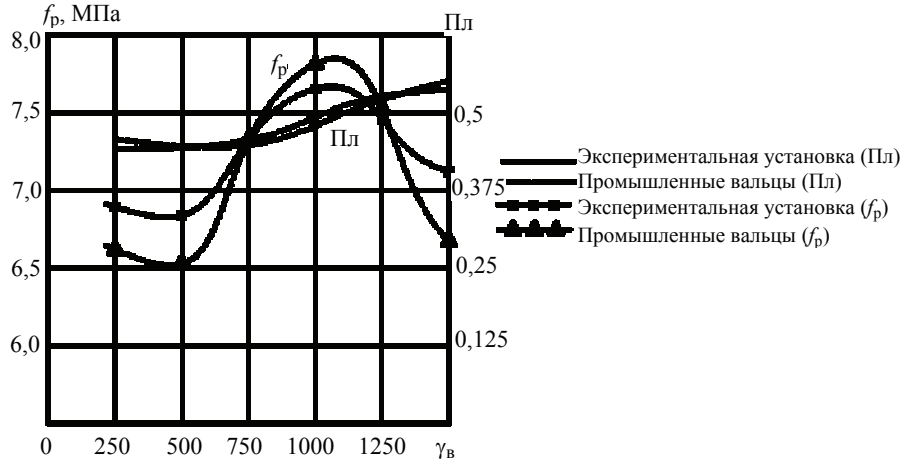

Рис. 4. Зависимости условной прочности при разрыве $f_р$, пластичности Пл от величины суммарного сдвига $\gamma_в$, полученные на вальцах СМ 80/80 200 (ЭУ2) и промышленных вальцах ЛБ 320/320 550

На рисунке 5 показаны зависимости условной прочности при разрыве $f_р$ и пластичности Пл от частоты вращения u при h_0 = 1,5 мм, различных значений фрикции (f = 1:1,1; 1:1,2; 1:1,36) и непрерывном режиме вальцевания резиновой смеси ИРП-6721. Анализ экспериментальных данных показывает, что максимальное значение условной прочности при разрыве $f_р$ и нормированное значение пластичности Пл соответствуют фрикции f = 1:1,2 и частоте вращения u = 20 об/мин.

На рисунке 6 показаны зависимости условной прочности при разрыве $f_р$ и пластичности Пл от частоты вращения u при фрикции f = 1:1,2, различных значениях межвалкового зазора (h_0 = 1,0; 1,5; 2 мм) и непрерывном режиме вальцевания резиновой смеси ИРП-6721. Максимальное значение условной прочности при разрыве $f_р$ и нормированное значение пластичности Пл соответствуют фрикции f = 1:1,2, минимальному межвалковому зазору $h_{0в}$ = 1,5 мм и частоте вращения u = 20 об/мин.

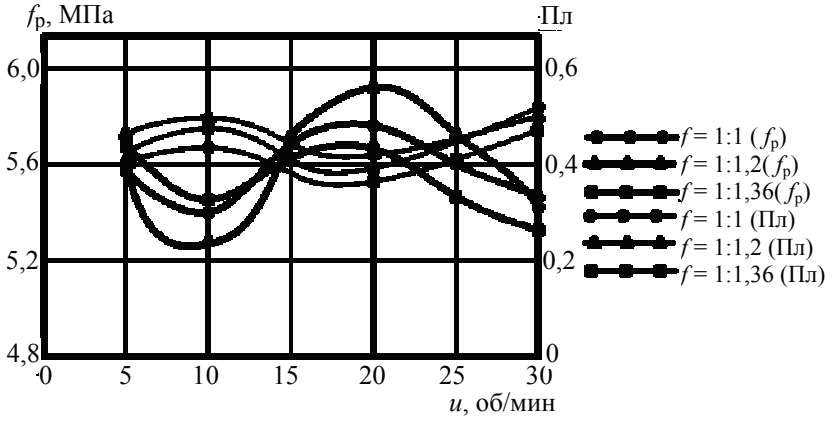

Рис. 5. Зависимости условной прочности при разрыве $f_р$ и пластичности Пл от частоты вращения u при h_0 = 1,5 мм, различных значениях фрикции f и непрерывном режиме работы вальцов

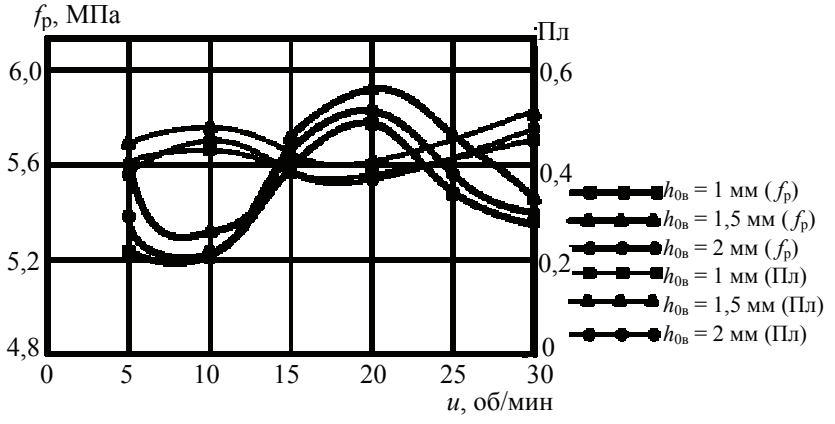

Рис. 6. Зависимости условной прочности при разрыве $f_р$ и пластичности Пл от частоты вращения u при фрикции f = 1:1,2, различных значениях минимального межвалкового зазора $h_{0в}$ и непрерывном режиме работы вальцов

На рисунке 7 представлены зависимости условной прочности при разрыве $f_р$, пластичности Пл и времени вальцевания t от величины сдвига $\gamma_в$ при периодическом и непрерывном режимах работы вальцов на примере резиновой смеси шифра ИРП-6721. Лучшие показатели по прочности наблюдаются при одинаковой величине сдвига, однако при непрерывном процессе время вальцевания примерно в 2 раза меньше, чем при периодическом. Следовательно, производительность увеличивается примерно в 2 раза.

Для проверки влияния суммарной величины сдвига на физико-механические показатели пластиката резиновой смеси шифра ИРП-6721 проведены эксперименты на вальцах с диаметром валков 320 мм и рабочей длиной 550 мм. После расчета суммарной величины сдвига и обработки экспериментальных данных построены графические зависимости физико-механических свойств пластиката $f_р$ от величины сдвига $\gamma_в$ (см. рис. 7), в сравнении с такими же зависимостями, полученными на экспериментальной установке ЭУ2 [3].

Наилучшие физико-механические показатели пластиката резиновой смеси наблюдаются при такой же величине сдвига $\gamma_в$, как и при экспериментальных исследованиях на промышленных вальцах ЛБ 320/320 550 (рис. 8). Расхождение между физико-механическими показателями составили не более 7 %.

Известно, что при непрерывном вальцевании полимерных материалов полезная мощность и производительность вальцов зависят от величины объема материала, находящегося на валках вальцов, определяемого их размерами; частоты вращения валков; зазора и фрикции между ними; температуры переработки и реологии перерабатываемого материала [3]. Полезная мощность определяется удельной мощностью P, которая показывает эффективность работы вальцов, то есть если вести процесс непрерывного вальцевания при максимальном ее значении, то вся механическая энергия расходуется на пластикацию перерабатываемого материала. Максимальное значение удельной мощности определяется величиной безразмерной координаты сечения входа в зоне загрузки $X_{нн}$ для каждого конкретного индекса течения перерабатываемого материала.

Таким образом, существующая очевидная взаимосвязь между величиной объема материала, находящегося на валках вальцов, их размерами, частотой вращения валков, зазором и фрикцией между ними, температурой переработки

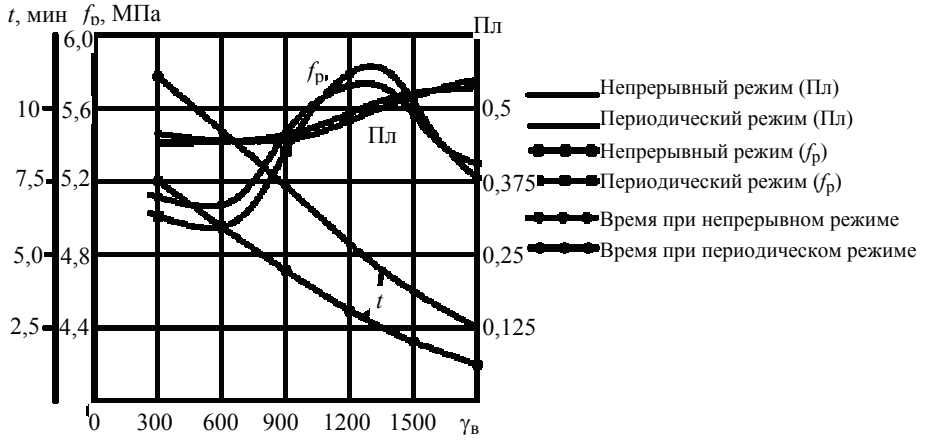

Рис. 7. Зависимости условной прочности при разрыве $f_р$, пластичности Пл и времени вальцевания t от величины сдвига $\gamma_в$ при периодическом и непрерывном режимах работы вальцов: f = 1:1,2; $h_{0в}$ = 1,5 мм

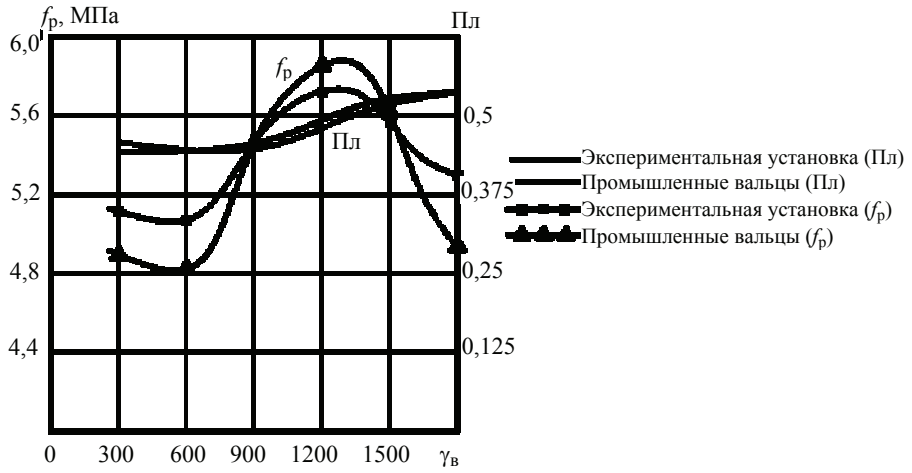

Рис. 8. Зависимости условной прочности при разрыве $f_р$ и пластичности Пл от величины суммарного сдвига $\gamma_в$, полученные на вальцах СМ 80/80 200 (ЭУ2) и промышленных вальцах ЛБ 320/320 550

и реологии перерабатываемого материала [3] позволяет не проводить методами имитационного моделирования исследования влияния режимных переменных и конструктивных параметров на величину полезной мощности и производительность вальцов.

Заключение

На основе анализа зависимостей (см. рис. 1 – 8) и существующей очевидной взаимосвязи между величиной объема материала, находящегося на валках вальцов, установлено, что режимные переменные (f, u) и конструктивные параметры валкового оборудования ($h_{0в}$, $D_в$, $L_в$) являются примерно равновесными.

Список литературы

1. Влияние подвулканизации на относительное изменение размеров длинномерных резинотехнических заготовок / М. В. Соколов, А. С. Клинков, П. С. Беляев, В. Г. Однолько // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. Серия: Технические науки. – 2008. – № 2(12), Т. 2. – С. 116–120.

2. Применение интегральных критериев качества при переработке полимерных материалов валково-шнековым методом / А. С. Клинков, М. В. Соколов, Д. Л. Полушкин, И. В. Шашков, П. С. Беляев, Д. В. Туляков // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2008. – Т. 14, № 4. – С. 870–881.

3. Методология расчета оборудования для производства длинномерных резинотехнических заготовок заданного качества / М. В. Соколов, А. С. Клинков, П. С. Беляев, В. К. Скуратов, В. Г. Однолько. – Москва : Машиностроение, 2009. – 352 с.

4. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2008613114 Российская Федерация. Расчет интегрального критерия качества – суммарной величины сдвига для непрерывного вальцевания : № 2008612201 : заявл. 19.05.2008 : регистрация 27.06.2008 / С. С. Гуреев, Д. Л. Полушкин, М. В. Соколов, А. С. Клинков, П. С. Беляев; Тамб. гос. техн. ун-т.

The Influence of Operating Variables and Design Parameters of Roll Machines on Energy Consumption and Quality Indicators of Rubber Compounds under Continuous Plasticization

© M. V. Sokolov[1]✉, P. S. Belyaev[2], D. V. Tulyakov[3]

[1] *Department of Computer-Integrated Systems in Mechanical Engineering, msok68@mail.ru;*
[2] *Department of Materials and Technology, TSTU, Tambov, Russian Federation;*
[3] *Tambov Business College, Tambov, Russian Federation*

Keywords: inter-roll gap; rubber compound plasticity; scorching; total shear during rolling; tensile strength; friction.

Abstract: The influence of the design and process parameters of a rolling machine for intermittent and continuous plasticization of NO-68-1 rubber compound on its quality indicators, such as tensile strength, plasticity, and scorching, is examined. It is noted that continuous rolling of the rubber compound consistently achieves better quality indicators with a shorter plasticization time. To select control parameters for optimizing the rolling process and the design of the working elements of rolling machines for processing rubber compounds in continuous plasticization mode, the nature and significance of the influence of the main process and design parameters on the state functions, i.e., their correlation, is determined.

References

1. Sokolov M.V., Klinkov A.S., Belyayev P.S., Odnol'ko V.G. [The Effect of Scorch on the Relative Change in the Dimensions of Long Rubber Industrial Blanks], *Voprosy sovremennoy nauki i praktiki. Universitet im. V. I. Vernadskogo. Seriya: Tekhnicheskiye nauki* [Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University. Series: Technical Sciences], 2008, no. 2(12), vol. 2, pp. 116-120. (In Russ., abstract in Eng.)

2. Klinkov A.S., Sokolov M.V., Polushkin D.L., Shashkov I.V., Belyayev P.S., Tulyakov D.V. [Application of Integral Quality Criteria in the Processing of Polymeric Materials by the Roller-Auger Method], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2008, vol. 14, no. 4, pp. 870-881. (In Russ., abstract in Eng.)

3. Sokolov M.V., Klinkov A.S., Belyayev P.S., Skuratov V.K., Odnol'ko V.G. *Metodologiya rascheta oborudovaniya dlya proizvodstva dlinnomernykh rezinotekhnicheskikh zagotovok zadannogo kachestva* [Methodology for Calculating Equipment for the Production of Long Rubber Blanks of Specified Quality], Moscow: Mashinostroyeniye, 2009, 352 p. (In Russ.)

4. Gureyev S.S., Polushkin D.L., Sokolov M.V., Klinkov A.S., Belyayev P.S. *Raschet integral'nogo kriteriya kachestva – summarnoy velichiny sdviga dlya nepreryvnogo val'tsevaniya* [Calculation of the Integral Quality Criterion – the Total Value of Shear for Continuous Rolling], Certificate of Official Registration of the Computer Program No. 2008613114 Russian Federation (In Russ.)

Einfluss von Prozessvariablen und Konstruktionsparametern von Walzmaschinen auf den Energieverbrauch und die Qualitätsindikatoren von Gummimischungen im kontinuierlichen Modus ihrer Plastifizierung

Zusammenfassung: Es ist der Einfluss der Konstruktions- und Prozessparameter einer Walzmaschine zur periodischen und kontinuierlichen Plastifizierung der Kautschukmischung NO-68-1 auf deren Qualitätsmerkmale wie Zugfestigkeit, Plastizität und Anbrennen untersucht. Es ist gezeigt, dass durch kontinuierliches Walzen der Kautschukmischung stabil bessere Qualitätsmerkmale bei kürzerer Plastifizierungszeit erzielt werden. Um die Steuerungsparameter zur Optimierung des Walzprozesses und die Konstruktion der Arbeitselemente von Walzmaschinen für die Verarbeitung von Kautschukmischungen im kontinuierlichen Plastifizierungsmodus auszuwählen, sind Art und Bedeutung des Einflusses der wichtigsten Prozess- und Konstruktionsparameter auf die Zustandsfunktionen, d. h. deren Korrelation, festgelegt.

Influence des variables de régime et des paramètres de conception des machines à rouleaux sur la consommation d'énergie et les indicateurs de qualité des mélanges de caoutchouc en mode continu de leur plastification

Résumé: Est examiné l'impact des paramètres structurels et technologiques de la machine à rouleaux dans les modes périodiques et continus de la plastification du mélange de caoutchouc NO-68-1 sur ses indicateurs de qualité, tels que la résistance à la rupture conditionnelle, la plasticité, le scorching. Il est à noter que le laminage continu du mélange de caoutchouc permet d'obtenir des performances stables et de meilleure qualité en moins de temps de plastification. Afin de choisir les paramètres de contrôle lors de l'optimisation du processus de laminage et de la conception des organes de travail des machines à rouleaux pour le traitement des mélanges de caoutchouc en mode continu de leur plastification, sont établis la nature et le poids de l'influence des paramètres technologiques et structurels fondamentaux entre eux sur les fonctions de l'état, c'est-à-dire leur corrélation.

Авторы: ***Соколов Михаил Владимирович*** – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении»; ***Беляев Павел Серафимович*** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Материалы и технология», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Российская Федерация; ***Туляков Денис Валерьевич*** – преподаватель ТОГАПОУ «Тамбовский бизнес-колледж», Тамбов, Российская Федерация.