

ВЛИЯНИЕ СТЕПЕНИ ПЛАСТИКАЦИИ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ РЕЗИНОВОЙ СМЕСИ ПРИ НЕПРЕРЫВНОМ ВАЛЬЦЕВАНИИ

М. В. Соколов

*Кафедра «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении»,
msok68@mail.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия*

Ключевые слова: величина сдвига; координаты сечения входа и выхода; пластичность; полезная мощность; условная прочность при разрыве.

Аннотация: Представлены экспериментальная установка на базе лабораторных и промышленных валковых машин, методика и результаты исследования физико-механических показателей резиновых смесей в зависимости от степени пластикации при непрерывном и периодическом режимах их вальцевания. Дан сравнительный анализ изменения значений основных показателей качества и учтено влияние режимных и конструктивных параметров процесса вальцевания с помощью интегрального критерия качества – величины сдвига, рациональные значения которого позволяют прогнозировать и обеспечивать необходимые или заданные показатели качества резиновых смесей.

Для проведения исследований разработанного технологического процесса пластикации резиновых смесей спроектирована и изготовлена экспериментальная установка ЭУ2 на базе вальцов СМ 200 80/80 с полыми валками диаметром 80 мм и рабочей длиной 200 мм [1]. Валки расположены в горизонтальной плоскости и вращаются навстречу друг другу. Регулировка частоты вращения валков осуществляется плавно с помощью тиристорного преобразователя. Валки вальцов смонтированы в подшипниках скольжения и установлены в корпусах на станинах. Передачу вращающего момента осуществляют передаточные и фрикционные шестерни от вала электродвигателя постоянного тока типа 4ПБМ160МГМ04 через редуктор. Число оборотов валков, об/мин: задний 0...40,8; передний 0...30; фрикции между валками: 1:1; 1:1,2; 1:1,36.

Приводные и передаточные шестерни заключены в кожухи, нижняя часть которых представляет собой масляные ванны для смазки пар. Каждая из двух станин сверху стянута поперечиной и установлена на фундаментной плите. Корпуса подшипников заднего валка закреплены в станинах неподвижно; переднего – установлены так, что имеют возможность перемещаться в станинах с целью регулировки зазора между валками. Механизм регулировки зазора позволяет перемещать подшипники переднего валка по направляющим станины и фиксировать их в заданном положении. Регулировка зазора проводится при помощи пары «винт – гайка», расположенных по обе стороны переднего (рабочего) валка.

На каждой из станин вальцов, со стороны рабочего валка, имеются указатели величины зазора для устранения перекаса валков. Механизм регулировки зазора снабжен предохранительным устройством. При переработке резиновой смеси выставленная величина зазора проверялась прокатыванием между валками с левой и правой сторон свинцовых полос и измерением их толщины ручным

калиброммером с точностью до $\pm 0,05$ мм. Для поддержания заданного температурного режима пластикации резиновых смесей валки вальцов снабжены устройствами для подвода теплоносителя. Подогрев теплоносителя осуществляется в термостате типа ТС-16.

Замер температуры поверхности валков проводился с применением лучковой насадки термометра термоэлектрического контактного ТПК-1 до и после опыта. Измерение температуры вальцуемого материала осуществлялось посредством игольчатой насадки термометра термоэлектрического контактного ТПК-1 в процессе всего опыта.

С целью предотвращения попадания обрабатываемого материала в подшипники валков установлены стрелы ограничительные. Обеспечение безопасности обслуживающего персонала достигается установкой на вальцах аварийного устройства. В экспериментальной установке применено электродинамическое торможение. Для смазки поверхностей трущихся пар вальцы снабжены системой смазки. Для обеспечения непрерывной переработки отходов вальцы снабжены загрузочным бункером и отборочным устройством.

Определение безразмерных координат сечения входа X_H и выхода X_K . Измерение координаты сечения входа x_H проводили следующим образом. После выхода на заданный установившийся режим вальцевания вальцы останавливали и проводили измерение величин c и e , как показано в книге [1].

Величина координаты сечения входа x_H определяется следующим образом:

$$x_H = R + c - e,$$

где R – радиус валка, м.

Величина безразмерной координаты сечения входа X_H определяется по формуле

$$X_H = \frac{x_H}{\sqrt{2Rh_{02}}},$$

где h_{02} – минимальный межвалковый зазор, см.

Между безразмерными координатами входа X_H и выхода X_K существует связь, представленная в работе [74]:

$$\int_{X_H}^{X_K} \frac{(X_K^2 - X^2)^{1/n} dX}{(1 + X^2)^{1+2/n}} - \int_{X_K}^{-X_K} \frac{(X - X_K^2)^{1/n} dX}{(1 + X^2)^{1+2/n}} = 0.$$

Решая это интегральное уравнение численными методами, находим при каждом значении индекса течения n безразмерную координату сечения входа X_H , которой соответствует единственное значение безразмерной координаты сечения выхода X_K . Зависимость X_K от X_H при различных значениях n представлена на рис. 1 [1].

Для определения оптимального объема материала на валках необходимо знать, при какой величине безразмерной координаты сечения входа в зоне загрузки X_H величина удельной мощности P , характеризующая интенсивность механического воздействия на обрабатываемый материал, будет максимальной. Удельная мощность P рассчитывается по формулам [1]

$$P = \frac{N_n}{V} = \mu \left(\frac{U_1}{h_{02}} \right)^{n+1} \left(\frac{2n+1}{n} \right)^n F_0 \left(X_K, n, \frac{R}{h_{02}} \right), \quad (1)$$

где N_n – полезная мощность, расходуемая на деформацию обрабатываемого материала в зазоре валков вальцов, работающих по непрерывному режиму, кВт; V – величина объема материала, находящегося на валках вальцов, м³; μ – вязкость материала, Па·с; U_1 – частота вращения переднего валка, об/мин; h_{02} – половина величины минимального зазора между валками, м; R – радиус валка, м;

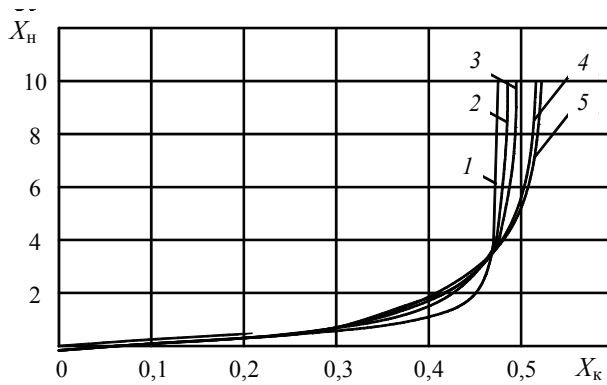


Рис. 1. Зависимости координаты X_k от X_n при различных значениях n :
 1 – 1; 2 – 0,5; 3 – 0,38; 4 – 0,2; 5 – 0,125

$$F_0\left(X_k, n, \frac{R}{h_{02}}\right) = \frac{\int_{X_{k0}}^{X_{kk}} \int_{X_k}^{X_n} \frac{(\pm X^2 \mp X_k^2)^n}{(1+X^2)^{2n}} \Psi(X_k) dX dX_k}{\int_{X_{k0}}^{X_{kk}} \left\{ \frac{8,88}{\sqrt{\frac{R}{h_{02}}}} (1+X_k^2) \left[\frac{R}{h_{02}} + (1+X_k^2) \right] - (1+X_k^2) \times \right.} \rightarrow$$

$$\left. \times (X_k + X_n) + X_n + X_k + \frac{1}{3} (X_n^3 + X_k^3) \right\} \Psi(X_k) dX_k}, \quad (2)$$

где

$$\Psi(X_k) = \frac{6X_k^4 + 10X_k^2}{(1+X_k^2)^2} (X_k + X_k^3 + 0,6X_k^5 + 0,143X_k^7 - X_n - X_n^3 - 0,6X_n^5 -$$

$$- 0,143X_n^7) + 6X_k \arctg X_n (X_n + X_n^3 + 0,6X_n^5 + 0,143X_n^7) - 6X_k \arctg X_k \times$$

$$\times (X_n + X_n^3 + 0,6X_n^5 + 0,143X_n^7) - X_k^3 (3,4 + 3,34X_k^2 + 0,86X_k^4) +$$

$$+ X_k X_n^2 (3,4 + 3,34X_n^2 + 0,86X_n^4) + 1,4X_k \ln(1+X_k^2) - 1,4X_n \ln(1+X_n^2). \quad (3)$$

С помощью программы для ЭВМ [2], алгоритм которой представлен на рис. 2, а идентификаторы в табл. 1, построены графические зависимости удельной мощности P от величины безразмерной координаты сечения входа в зоне загрузки X_n (для трех различных значений R/h_{02}) [1].

Анализ результатов расчета показывает наличие максимума в области $X_n = 2,1$. Следовательно, существует такой оптимальный объем материала на валках, при котором работа, затрачиваемая на его деформацию, будет максимальной. Поэтому ведение непрерывного процесса вальцевания резиновых смесей с таким объемом загрузки будет наиболее рационально с точки зрения интенсивности механического воздействия на обрабатываемый материал.

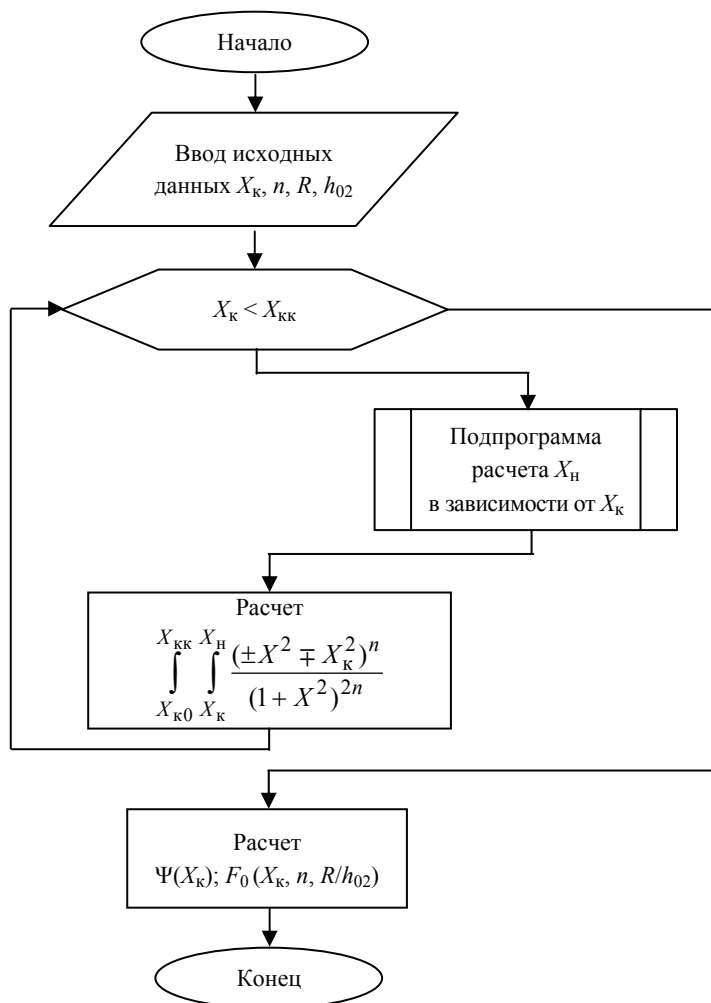


Рис. 2. Блок-схема алгоритма расчета удельной мощности, затрачиваемой на процесс вальцевания

Таблица 1

Идентификаторы к программе расчета удельной мощности P

Величина	Обозначение	Обозначение в программе (идентификаторы)
Безразмерная координата выхода	X_k	Xk
Текущее значение безразмерной координаты выхода	X_{kk}	Xkk
Безразмерная координата входа	X_n	Xn
Текущее значение безразмерной координаты	X	X
Радиус валка, см	R	R
Индекс течения материала	n	n
Минимальный межвалковый зазор, см	h_{02}	h0

Экспериментальные исследования проводили следующим образом. Включали питание ЭУ2; устанавливали заданный минимальный зазор между валками h_0 ; монтировали отборочное устройство; устанавливали фрикцию между валками f ; разогревали до заданной температуры поверхности валков; устанавливали частоту вращения переднего валка $u = 5$ об/мин; непрерывно загружали с левой стороны вальцов резиновую смесь; вальцевали ее, проверяли точность зазора между валками и измеряли температуру резиновой смеси; после выхода на заданный установившийся режим регистрировали показания амперметра, массу полученной ленты заданного сечения за определенный промежуток времени с целью определения производительности; полученные ленты резиновой смеси наматывали на бобину для последующего определения прочности и относительного удлинения при разрыве. Затем валковую установку останавливали. После этого устанавливали частоту вращения переднего валка $u = 10$ об/мин и проводили действия как и при $u = 5$ об/мин. Такой же порядок действий при $u = 15; 20; 25; 30$ об/мин. За результат испытаний принимали среднее арифметическое всех параллельных определений для каждого эксперимента.

Прочность и относительное удлинение при разрыве вулканизованных образцов, полученных по непрерывному процессу вальцевания, определяли по следующей методике.

Пластикат резиновой смеси закладывался в пресс-форму, которую устанавливали в вулканизационный пресс и прессовали при температуре 140 °С, давлении 100 кГс/см² в течение 30 мин. Из полученных прессованием пластин вырубались образцы.

Испытания на растяжение проводили согласно ГОСТ 11262–2017. Образцы должны иметь гладкую ровную поверхность без вздутий, сколов, трещин, раковин и других дефектов. Образцов для каждого опыта было не менее пяти.

Испытания проводились на разрывной машине СМГИ-Ц-250. Скорость движения захватов в испытательной машине 28 мм/мин. Перед испытанием измеряли толщину и ширину образцов в их рабочей части с точностью до $0,01$ мм не менее чем в трех местах. Образцы, у которых результаты измерений толщины и ширины рабочей части различались больше, чем на $0,2$ мм, заменялись другими.

Перед испытанием на образец наносили метки, ограничивающие его базу и положение кромок захватов. Нанесение меток не должно приводить к изменению свойств образца и его разрушению по меткам. Образец закрепляли в захваты разрывной машины по меткам, определяющим положение кромок захватов на образце, так, чтобы исключить его скольжение в процессе испытания, при этом разрушение его не должно происходить в месте закрепления. Продольная ось образца должна совпадать с осью захватов и направлением хода подвижного захвата.

В момент достижения предела разрушения измеряли нагрузку и удлинение. В расчет принимали результаты, полученные на образцах, разрушившихся в пределах рабочей части. Условную прочность при разрыве f_p вычисляли по формуле

$$f_p = P_p / (bh),$$

где P_p – нагрузка, при которой образец разрушался, кГс; b , h – ширина и толщина рабочей части образца, см.

Относительное удлинение при разрыве ε вычисляли по формуле

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} 100 \%,$$

где Δl – приращение образца при разрыве, мм; l_0 – начальная длина образца, см.

За результат испытаний принимали среднее арифметическое значение из трех измеренных значений параметра для каждого эксперимента.

Зависимости условной прочности при разрыве f_p и пластичности Пл от частоты вращения u при $h_{02} = 1,5$ 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. 3, из которого видно, что максимальное значение условной прочности при разрыве f_p и нормированное значение пластичности соответствуют фрикции $f = 1:1,2$ и частоте вращения $u = 20$ об/мин.

На рисунке 4 представлены зависимости предела условной прочности при разрыве f_p и пластичности Пл от частоты вращения u при фрикции $f = 1:1,2$, различных значениях минимального межвалкового зазора ($h_{02} = 1,0; 1,5; 2$ мм) и непрерывном режиме вальцевания резиновой смеси НО-68НТА. Экспериментальные исследования показали, что максимальное значение условной прочности при разрыве f_p и нормированное значение пластичности Пл соответствуют фрикции $f = 1:1,2$, минимальному межвалковому зазору $h_{02} = 1,5$ мм и частоте вращения $u = 20$ об/мин.

На рисунке 5 показаны зависимости условной прочности при разрыве f_p , пластичности Пл и времени вальцевания t от величины сдвига γ_v [3] при периодическом и непрерывном режиме работы валцов на примере резиновой смеси шифра НО-68НТА. Расчет интегрального критерия качества – величины сдвига γ_v , рассмотрен в статье [3]. Из анализа кривых можно сделать вывод, что 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 пластика резиновой смеси шифра НО-68НТА проведены экспериментальные исследования на валцах с диаметром валков 320 мм и рабочей длиной валка 550 мм. После расчета суммарной величины сдвига и обработки экспериментальных данных построены графические зависимости физико-механических показателей пластика f_p , Пл от величины сдвига γ_v , показанные на рис. 6, в сравнении с такими же зависимостями, полученными на экспериментальной установке ЭУ2.

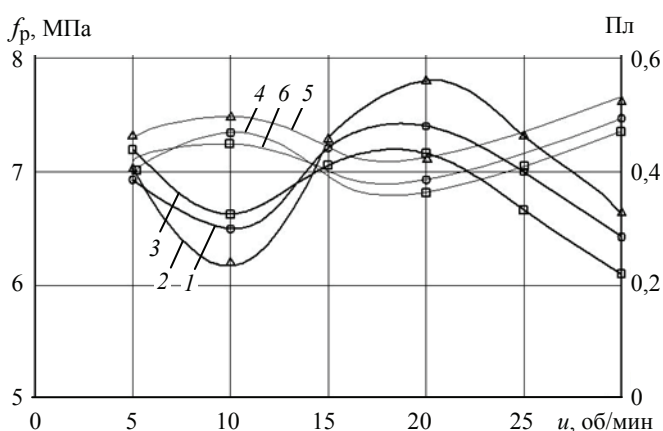


Рис. 3. Зависимости условной прочности при разрыве f_p (1–3) и пластичности Пл (4–6) от частоты вращения u при $h_{02} = 1,5$ мм, различных значениях фрикции f и непрерывном режиме работы валцов: 1, 4 – 1:1; 2, 5 – 1:1,2; 3, 6 – 1:1,36

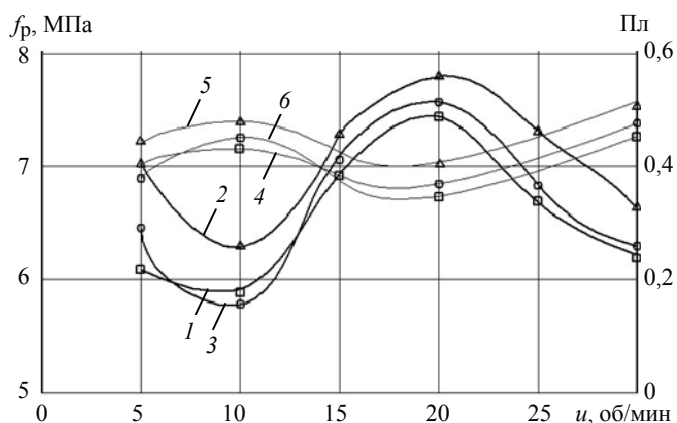


Рис. 4. Зависимости условной прочности при разрыве f_p (1 – 3) и пластичности Пл (4 – 6) от частоты вращения u при фрикции $f = 1; 1,2; 2$; непрерывном режиме работы валцов и различных значениях межвалкового зазора h_{02} , мм: 1, 4 – 1; 2, 5 – 1,5; 3, 6 – 2

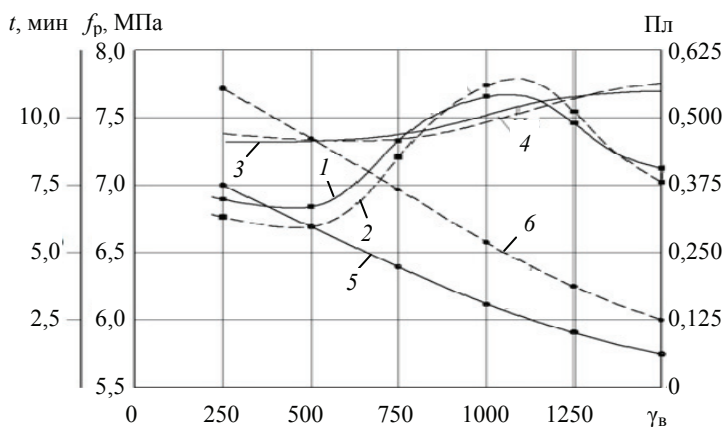


Рис. 5. Зависимости условной прочности при разрыве f_p (1, 2), пластичности Пл (3, 4) и времени вальцевания t (5, 6) от величины сдвига γ_B при периодическом (2, 4, 6) и непрерывном (1, 3, 5) режимах работы валцов (резиновая смесь шифра НО-68НТА)

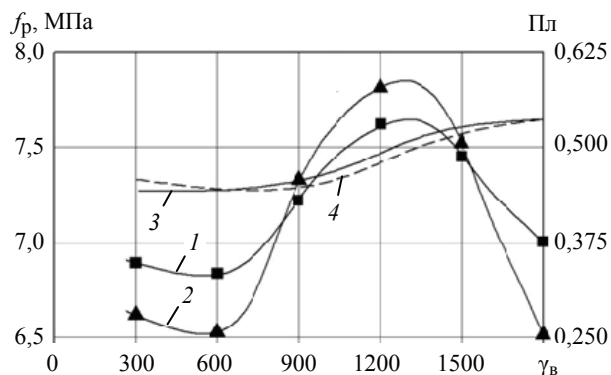


Рис. 6. Зависимости условной прочности при разрыве f_p (1, 2), пластичности Пл (3, 4) от величины суммарного сдвига γ_B , полученные на валцах СМ 80/80 200 (ЭУ2) (1, 3) и промышленных валцах ЛБ 320/320 550 (2, 4)

Из анализа кривых (см. рис. 5) можно сделать вывод, что наилучшие физико-механические показатели пластика резиновой смеси наблюдаются при такой же величине сдвига γ_v , как и в экспериментальных исследованиях на промышленных вальцах СМ 320/320 550 (см. рис. 6). Расхождения между физико-механическими показателями составили не более 9 %.

На рисунке 7 показаны зависимости условной прочности при разрыве f_p 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_p и нормированное значение пластичности Пл соответствуют фрикции $f = 1:1,2$ и частоте вращения $u = 20$ об/мин.

На рисунке 8 представлены зависимости условной прочности при разрыве f_p 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. Из анализа экспериментальных зависимостей видно, что максимальное значение условной прочности при разрыве f_p и нормированное значение пластичности Пл соответствуют фрикции $f = 1:1,2$, минимальному межвалковому зазору $h_{02} = 1,5$ мм и частоте вращения $u = 20$ об/мин.

На рисунке 9 показаны зависимости условной прочности при разрыве f_p , пластичности Пл и времени вальцевания t от величины сдвига γ_v при периодическом и непрерывном режимах работы вальцов на примере резиновой смеси шифра ИРП-6721.

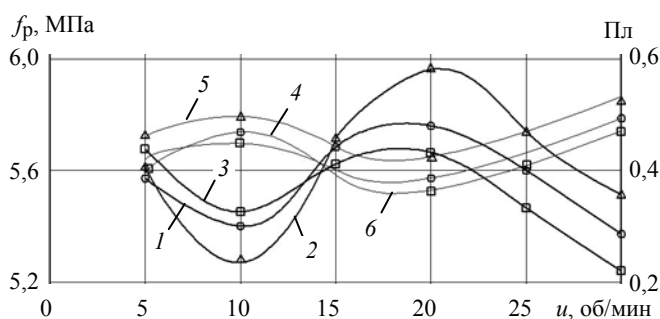


Рис. 7. Зависимости условной прочности при разрыве f_p (1 – 3) и пластичности Пл (4 – 6) от частоты вращения u при $h_0 = 1,5$ мм; непрерывном режиме работы вальцов и различных значениях фрикции f : 1, 4 – 1:1; 2, 5 – 1:1,2; 3, 6 – 1:1,36

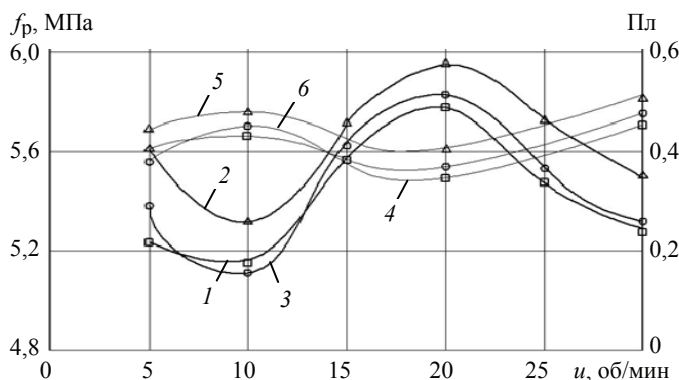


Рис. 8. Зависимости условной прочности при разрыве f_p (1 – 3) и пластичности Пл (4 – 6) от частоты вращения u при фрикции $f = 1:1,2$; непрерывном режиме работы вальцов и различных значениях минимального межвалкового зазора h_{02} : 1, 4 – 1; 2, 5 – 1,5; 3, 6 – 2

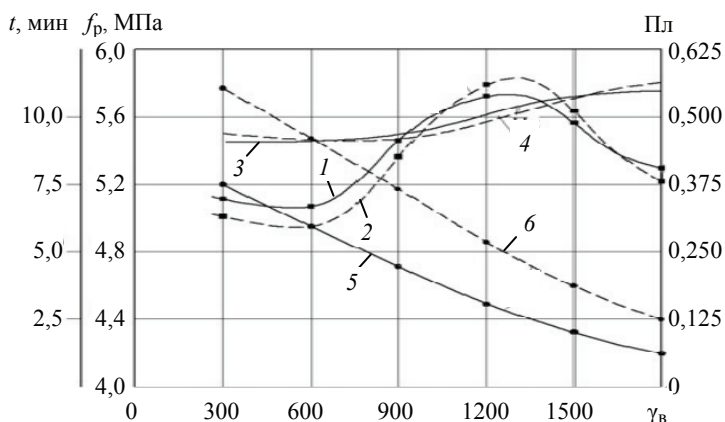


Рис. 9. Зависимости условной прочности при разрыве f_p (1, 2), пластичности Пл (3, 4) и времени вальцевания t (5, 6) от величины сдвига γ_v при периодическом (2, 4, 6) и непрерывном (1, 3, 5) режимах работы вальцов (резиновая смесь шифра ИРП-6721): $f = 1:1,2; h_{02} = 1,5$ мм

Из анализа зависимостей можно сделать вывод, что лучшие показатели по прочности наблюдаются при одинаковой величине сдвига, однако при непрерывном процессе время вальцевания примерно в 2 раза меньше, чем при периодическом (см. рис. 9). Следовательно, производительность увеличивается примерно в 2 раза.

Для проверки влияния суммарной величины сдвига на физико-механические показатели пластика 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 пластика f_p от величины сдвига γ_v в сравнении с такими же зависимостями, полученными на экспериментальной установке ЭУ2 (рис. 10). Из анализа зависимостей можно сделать вывод, что наилучшие физико-механические показатели пластика резиновой смеси наблюдаются при такой же величине сдвига γ_v , как и при экспериментальных исследованиях на промышленных вальцах ЛБ 320/320 550. Расхождения между физико-механическими показателями составили не более 7 %.

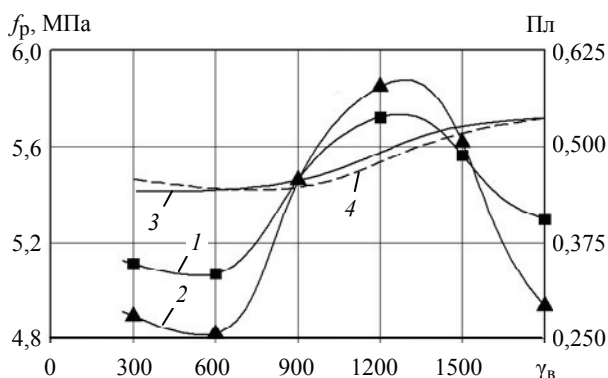


Рис. 10. Зависимости условной прочности при разрыве f_p (1, 2) и пластичности Пл (3, 4) от величины суммарного сдвига γ_v , полученные на вальцах СМ 80/80 200 (ЭУ2) (1, 3) и промышленных вальцах ЛБ 320/320 550 (2, 4)

Список литературы

1. Методология расчета оборудования для производства длиномерных резинотехнических заготовок заданного качества / М. В. Соколов, А. С. Клинков, П. С. Беляев [и др.]. – М. : Машиностроение, 2009. – 352 с.

2. Автоматизированное проектирование валковых машин для переработки полимерных материалов / А. С. Клинков, М. В. Соколов, В. И. Кочетов [и др.]. – М. : «Изд-во Машиностроение-1», 2005. – 320 с.

3. Применение интегральных критериев качества при переработке полимерных материалов валково-шнековым методом / А. С. Клинков, М. В. Соколов, Д. Л. Полушкин [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2008. – Т. 14, № 4. – С. 870 – 881.

The Influence of the Plasticization Degree on the Physical and Mechanical Properties of the Rubber Compound during Continuous Rolling

M. V. Sokolov

*Department of Computer-Integrated Systems in Mechanical Engineering,
msok68@mail.ru; TSTU, Tambov, Russia*

Keywords: shift value; coordinates of the entry and exit sections; plastic; useful power; conditional tensile strength.

Abstract: An experimental setup based on laboratory and industrial roller machines, a methodology and results of studying the physical and mechanical parameters of rubber compounds depending on the degree of plasticization in continuous and periodic modes of their rolling are presented.

A comparative analysis of the change in the values of the main quality indicators is given and the influence of the regime and design parameters of the rolling process is taken into account using the integral quality criterion - the magnitude of the shift, the rational values of which make it possible to predict and provide the necessary or specified indicators of the quality of rubber compounds.

References

1. 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-length rubber blanks of a given quality], Moscow: Mashinostroyeniye, 2009, 352 p. (In Russ.)

2. Klinkov A.S., Sokolov M.V., Kochetov V.I., Belyayev P.S., Odnol'ko V.G. *Avtomatizirovannoye proyektirovaniye valkovykh mashin dlya pererabotki polimernykh materialov* [Computer-aided design of roller machines for the processing of polymeric materials], Moscow: «Izdatel'stvo Mashinostroyeniye-1», 2005, 320 p. (In Russ.)

3. 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-screw method], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2008, vol. 14, no. 4, pp. 870-881. (In Russ., abstract in Eng.)

Der Einfluss des Plastifizierungsgrades auf die physikalisch-mechanischen Indikatoren der Gummimischung beim kontinuierlichen Rollen

Zusammenfassung: Es sind ein Versuchsaufbau auf Basis der Labor- und Industrierollenmaschinen, eine Methodik und Ergebnisse der Untersuchung der physikalischen und mechanischen Parameter von Gummimischungen in Abhängigkeit vom Plastifizierungsgrad in kontinuierlichen und periodischen Modi ihres Walzens vorgestellt. Es ist eine vergleichende Analyse der Änderungen der Werte der wichtigsten Qualitätsindikatoren gegeben und der Einfluss des Regimes und der Konstruktionsparameter des Walzprozesses ist mit Hilfe eines integralen Qualitätskriteriums berücksichtigt - der Größe der Verschiebung, deren rationale Werte es ermöglichen, die erforderlichen oder vorgegebenen Qualitätsindikatoren vorherzusagen und Indikatoren für die Qualität von Gummimischungen sicherzustellen.

Influence du degré de la plastification sur les indicateurs physiques et mécaniques du mélange de caoutchouc lors du laminage continu

Résumé: Sont présentées une installation expérimentale à la base de machines à rouleaux de laboratoire et industrielles, la méthodologie et les résultats de l'étude des indicateurs physico-mécaniques des mélanges de caoutchouc en fonction du degré de la plastification dans les modes du laminage continu et périodique. Est donnée une analyse comparative de l'évolution des valeurs des principaux indicateurs de qualité; est prise en compte l'influence des paramètres de mode et de conception du processus du roulement à l'aide du critère de la qualité integral - la valeur de cisaillement dont les valeurs nutritionnelles permettent de prédire et de fournir des indicateurs de qualité nécessaires ou prédéterminés pour les mélanges de caoutchouc.

Автор: *Соколов Михаил Владимирович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.