

УДК 678.057.2.001.57

Микулёнок И. О.

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ПЕРЕРАБОТКИ ПЛАСТМАСС И РЕЗИНОВЫХ СМЕСЕЙ НА ВАЛКОВЫХ МАШИНАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КЛИНОВЫХ УСТРОЙСТВ

Одним из путей интенсификации процессов каландрования и вальцевания пластмасс и резиновых смесей является использование устройств и приспособлений, изменяющих гидродинамику перерабатываемого материала на валковой машине. К таким устройствам относятся, в первую очередь, клиновые, состоящие из рабочего органа – клина, обычно снабжённого системой термостабилизации его рабочей поверхности, и механизма перемещения и фиксации его относительно валков.

Клин, образующий с одним или двумя валками дополнительные криволинейные сходящиеся (клиновые) рабочие зазоры, увеличивает зону активного воздействия валков на материал, усиливает смесительный и пластицирующий эффект оборудования, а также способствует дегазации обрабатываемого материала и повышает качество изделий или полуфабрикатов [1, 2].

В литературе имеются сведения о математическом моделировании как процесса течения перерабатываемого материала непосредственно в клиновом зазоре [3], так и в наиболее целесообразном варианте эксплуатации клинового устройства – в последовательно расположенных клиновом и межвалковом зазорах [4, 5].

В работе [5] рассмотрена математическая модель нестационарного течения псевдопластичного материала в клиновом зазоре с учётом его связи с расположенным после него межвалковым зазором, а в работе [4] сделан подобный анализ в изотермическом приближении, что существенно упрощает рассматриваемый процесс. Что касается работы [3], то в ней рассмотрено изотермическое течение материала в клиновом зазоре независимо от межвалкового зазора, что, как показало практическое использование клиновых устройств, нецелесообразно. Кроме того, в работе [3] отсутствуют сведения о граничных условиях по давлению в клиновом зазоре, а также сделано допущение о наличии градиента давления поперёк межвалкового зазора, что не подтверждено экспериментальными исследованиями.

Дальнейшая интенсификация переработки пластмасс и резиновых смесей на валковых машинах с использованием клиновых устройств требует разработки методики расчёта процесса каландрования и вальцевания с учётом наличия на валковой машине одного или нескольких клиновых устройств.

Целью данной работы является разработка комплексной методики расчёта процесса переработки на каландре или вальцах, снабжённых одним или несколькими клиновыми устройствами, термопластичных материалов, поведение которых под нагрузкой подчиняется степенному реологическому закону, а также рекомендаций по эффективному использованию клиновых устройств.

В процессе переработки материал с транспортёра поступает в загрузочный зазор каландра (межвалковый либо клиновой), распределяется вдоль валка и в виде предварительно отформованного листа выходит из зазора. Последующее движение материала от одного зазора, к другому способствует повышению качества перерабатываемого материала и её физико-механических свойств. При этом происходит непрерывное изменение температуры смеси вследствие диссипации механической энергии и теплообмена с рабочими органами и окружающим воздухом. Установка клиньев наиболее целесообразна в калибрующем или промежуточном межвалковых зазорах каландра, а также на входе в межвалковый зазор вальцов (рис. 1).

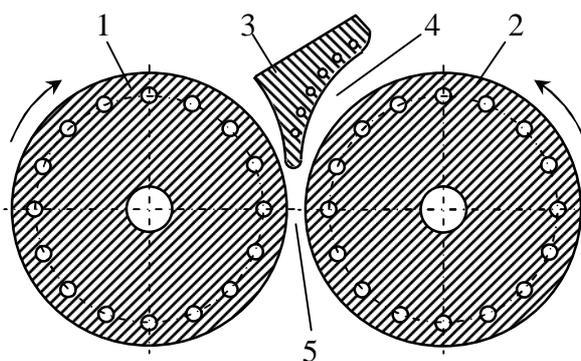


Рис. 1. Схема установки клинового устройства на вальцах:

1, 2 – валки; 3 – клин клинового устройства; 4, 5 – клиновой и межвалковый зазоры

Комплексное решение вопроса переработки материала на валковой машине с использованием клиновых устройств позволит правильно рассчитывать температуру материала, мощность, затрачиваемую в клиновых и межвалковых зазорах, а также величину распорных усилий, действующих на каждый из валков со стороны клинового и межвалкового зазоров. В этой связи необходимо проанализировать следующие возможные варианты взаимного расположения клинового и межвалкового зазоров:

1. Зоны деформации клинового и межвалкового зазоров не пересекаются и не соприкасаются, а между зонами имеется участок свободного движения материала на валке. Избыточное давление в клиновом зазоре изменяется от нуля до максимального и вновь падает до нуля в вершине клина, остаётся равным нулю при движении между зазорами и затем снова возрастает от нуля до максимума в межвалковом зазоре и падает до нуля на выходе из зазора.

2. Зоны деформации клинового и межвалкового зазоров соприкасаются. При этом конец зоны деформации клинового зазора, в котором избыточное давление отсутствует, совпадает с соответствующей координатой начала зоны деформации межвалкового зазора. В течение всего процесса переработки смесь контактирует с рабочими органами валковой машины. Избыточное давление в материале изменяется от нуля до нуля, проходя при этом через два (в обоих зазорах) максимума.

3. Зоны деформации клинового и межвалкового зазоров пересекаются. При этом конец зоны деформации клинового зазора расположен в пределах зоны деформации межвалкового зазора (рис. 2).

Давление в материале изменяется от нуля до максимального, затем до граничного значения в клиновом зазоре и от этой величины до максимального и опять до нуля в межвалковом зазоре. В зависимости от глубины погружения вершины клина в зону деформации межвалкового зазора изменяются суммарные распорные усилия, действующие на валки и клин, величина зоны деформации межвалкового зазора, а также потребляемая валками мощность, влияющая на температурное поле материала и его качество. Решение поставленных вопросов крайне важно для повышения производительности валковых машин и выпуска высококачественной продукции.

На основании теоретического и экспериментального исследования течения расплава перерабатываемого материала в межвалковом и клиновом зазорах разработана методика определения основных параметров валковых машин с использованием клинового устройства [6].

Предлагаемая методика даёт возможность определить:

- температурное поле материала в течение всего процесса переработки;
- усилия, действующие на валки и клин;
- крутящие моменты, действующие на валки машины, и мощности, необходимые для обеспечения указанных крутящих моментов;
- параметры системы теплоснабжения валков и клика;
- максимальные допустимые скорости переработки, обеспечиваемые оборудованием с точки зрения обеспечения необходимого температурного режима переработки.

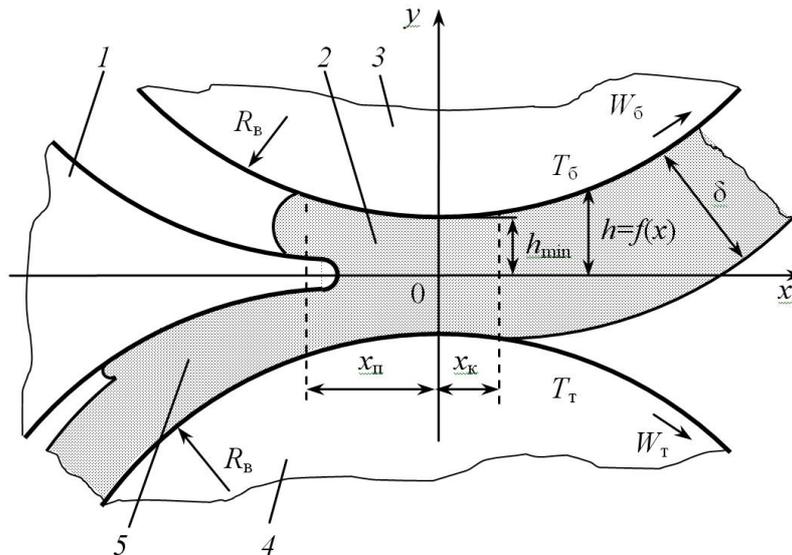


Рис. 2. Схема расположения клина в межвалковом зазоре каландра:

1 – клин; 2 – межвалковый зазор; 3, 4 – быстро- и тихоходный валки, образующие межвалковый зазор; 5 – криволинейный клиновидный сходящийся зазор; x , y – координаты, направленные вдоль и поперёк межвалкового зазора; $x_{п}$, $x_{к}$ – координаты начала и конца зоны деформирования; R_B – радиус вала; W_6 , W_T – окружные скорости быстроходного и тихоходного валков; h , h_{min} – половина текущей и минимальной величин межвалкового зазора; T_6 , T_T – температуры быстроходного и тихоходного валков

Исходными данными для расчёта являются параметры, необходимые для определения энергосиловых характеристик процесса каландрования [7], а также величина клинового зазора в вершине клина h_k , угол между клином и валком α , положение вершины клина $x_{вк}$ в системе координат «валок – валок», температура рабочей поверхности клина T_k и наличие системы термостабилизации его рабочей поверхности.

После определения реологических и теплофизических свойств материала в рабочем интервале температур переработки, теплофизических свойств теплоносителя и окружающего воздуха, окружных скоростей валков, а также величин межвалковых зазоров необходимо определить границы зон деформации материала в межвалковых [7] и клиновом (клиновых – при наличии нескольких устройств) зазорах.

Координату начала зоны деформации межвалкового зазора, расположенного непосредственно после клинового зазора, определяют предварительно [7]. Затем рассчитывают безразмерную координату x положения вершины клина в системе координат «валок – валок»:

$$x_{вк} = \frac{x_{вх}}{\sqrt{2R_B h_{min}}} \quad (1)$$

Если $\xi_{вх}$ не меньше величины ξ_n начала зоны деформации соответствующего межвалкового зазора, то вершина клина располагается вне зоны деформации межвалкового зазора, т. е. зоны деформации клинового и межвалкового зазоров не пересекаются. В этом случае предварительно найденная координата начала зоны деформации межвалкового зазора принимается в качестве ξ_n данного зазора.

Координата ξ_k конца зоны деформации клинового зазора определяется из выражения:

$$p = \frac{KW_B^n \operatorname{ctg} \alpha (1+n)^n (1+2n)^n x}{n^n h_H^{2n}} \int_0^x |h_H(1-x) - 2d|^n \operatorname{sign}[h_H(1-x) - 2d] \frac{1}{(1-x)^{2n+1}} dx, \quad (2)$$

с учётом того, что при $x = x_H$ и $x = x_K$ избыточное давление в клиновом зазоре равно нулю.

В зависимости (1) приняты следующие обозначения: W_B – скорость рабочей поверхности вала, образующего с клином клиновой зазор; K – коэффициент консистенции материала; n – показатель степени степенного реологического уравнения; h_H – величина клинового зазора в начале зоны деформации; δ – толщина ленты материала, снимаемой с вальцов.

В случае если значение координаты вершины клина x_{BK} меньше координаты межвалкового зазора x_H , то вершина клина располагается в пределах зоны деформации межвалкового зазора, т. е. зоны клинового и межвалкового зазоров пересекаются. При этом величина давления, развиваемого в межвалковом зазоре, определится выражением:

$$\int_{x_K}^{x_H} \left[\frac{|A|^n \operatorname{sign}(A) - |B|^n \operatorname{sign}(B)}{1+x^2} \right] dx = 0, \quad (3)$$

$$\text{где } A = \frac{(1+2n)(1+y)(x^2 - x_K^2)}{n(1+x^2)^2} + \frac{1-y}{1+x^2}; \quad B = -\frac{(1+2n)(1+y)(x^2 - x_K^2)}{n(1+x^2)^2} + \frac{1-y}{1+x^2};$$

ψ – коэффициент трения в межвалковом зазоре; ξ_K – безразмерная координата конца зоны деформации межвалкового зазора.

Координата ξ_K конца зоны деформации клинового зазора в системе координат «клин – валок» определяется из выражения (2) с учётом того, что при $x = x_K$ давление в клиновом зазоре (в вершине клина) соответствует давлению, развиваемому в межвалковом зазоре при $x = x_H$ в системе координат «валок – валок».

Для расчёта температурного поля перерабатываемого на валковой машине материала, а также, для определения потерь теплоты с поверхности материала и свободных поверхностей валков и клина необходимо знать углы, соответствующие координатам входа материала в зазоры и выхода из них и отсчитываемые от плоскости, проходящей через продольные оси валков, образующих рассматриваемый зазор. Зависимости для определения рабочих зон валков, не взаимодействующих с клином, представлены в работе [7]. Для вала, взаимодействующего с клином, величины угла зависят от взаимного расположения межвалкового и клинового зазоров. В случае, когда между вершиной клина последующим межвалковым зазором имеется участок контакта материала с окружающей средой, угол, соответствующий поверхности вала, покрытой материалом, определяется по зависимости [7] и уменьшается на величину, соответствующую клиновому зазору $g_{KL} = x_K/R_B$.

В противном случае угол, соответствующий пути течения материала в клиновом γ_{KLZ} и межвалковом $\gamma_{MЗ}$ зазорах, определится следующим образом:

$$g_3 = g_{KLZ} + g_{MЗ}. \quad (4)$$

Температурное поле полимера при его движении от загрузочного зазора до точки снятия изделия с машины определяется согласно [7] с учётом того, что на участке течения расплава в клиновом зазоре температурное поле материала определяется решением уравнения:

$$\left[1-h-h \left(1-h^n \right)^{\frac{1}{n}} \left(1+2n \right) \left(1-\frac{2d}{h_H(1-x)} \right) \right] \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{l \operatorname{ctga}}{r c_p h_H W_B (1-x)^2} \frac{\partial^2 T}{\partial e^2} + \frac{KW_B^n \operatorname{ctga}}{r c_p h_H^n (1-x)^{n+1}} \left| -1 - (1+2n) \left(1-\frac{2d}{h_H(1-x)} \right) \left(1-\frac{1+n}{n} e^{\frac{1}{n}} \right)^{n+1} \right|. \quad (5)$$

Уравнение (5) решают с учётом начального и граничных условий: $T_H = T(y)$; $T|_{e=0} = T_B$; $T|_{e=1} = T_K$, где T_B – температура вала; T_K – температура клина.

Выражение (5) является квазилинейным дифференциальным уравнением параболического типа, которое решается одним из численных методов, например, конечных разностей [8].

После определения температурного поля и средних температур материала, в рабочих зазорах машины находим усилия, действующие на валки и клин. Усилия, действующие на валки, не взаимодействующие с клином, определяются согласно методике [7].

Распорные усилия, действующие на клин и соответствующий валок, определяются зависимостью:

$$F_{\text{сп}} = \frac{LKW_{\text{в}}^n \text{ctg}^2 a (1+n)^n (1+2n)^n}{n^n h_{\text{н}}^{2n-1}} \int_{x_{\text{н}}}^{x_{\text{к}}} \int_{x_{\text{н}}}^x |h_{\text{н}}(1-x) - 2d|^n \text{sign}[h_{\text{н}}(1-x) - 2d] \frac{1}{(1-x)^{2n+1}} dx dx, \quad (6)$$

где L – длина клина, м.

Распорные усилия действуют по нормали к рабочим поверхностям клина и валка, а точки их приложения определяют координатой $\xi_{\text{цм}}$ центра тяжести площади под кривой давления клинового зазора [7].

Определение сил, являющихся результатом действия касательных напряжений на рабочих поверхностях клина $P_{\text{к}}$ и валка $P_{\text{в}}$, аналогично определению усилий, действующих на валки при переработке без использования клинового устройства. Указанные силы можно определить по зависимости:

$$P_{\text{к}} = \frac{LKW_{\text{в}}^n \text{ctg} a}{h_{\text{н}}^{n-1}} \int_{x_{\text{н}}}^{x_{\text{к}}} \left| -1 - (1+2n) \left(1 - \frac{2d}{h_{\text{н}}(1-x)} \right) \right|^n \text{sign} \left(-1 - (1+2n) \left(1 - \frac{2d}{h_{\text{н}}(1-x)} \right) \right) \frac{1}{(1-x)^n} dx; \quad (7)$$

$$P_{\text{в}} = \frac{LKW_{\text{в}}^n \text{ctg} a}{h_{\text{н}}^{n-1}} \int_{x_{\text{н}}}^{x_{\text{к}}} \left| -1 + \left(\frac{1+2n}{n} \right) \left(1 - \frac{2d}{h_{\text{н}}(1-x)} \right) \right|^n \text{sign} \left(-1 + \left(\frac{1+2n}{n} \right) \left(1 - \frac{2d}{h_{\text{н}}(1-x)} \right) \right) \frac{1}{(1-x)^n} dx. \quad (8)$$

Вектор суммарных усилий, действующих на валок (клин), определяется как сумма векторов веса валка (клина), векторов распорных усилий и сил трения, действующих со стороны материала, деформируемого в рабочих зазорах.

Крутящие моменты, действующие на валки, не взаимодействующие с клином, определяют по методике [7].

Крутящие моменты, действующие со стороны материала на клин и валок, определяют из выражений:

$$M_{\text{к}} = P_{\text{к}} R_{\text{к}}; \quad M_{\text{в}} = P_{\text{в}} R_{\text{в}}. \quad (9)$$

Общий крутящий момент, действующий на валок, взаимодействующий с клином, определяется суммой моментов, действующих на него при деформации материала во всех рабочих зазорах, образуемых данным валком.

Мощность, затрачиваемая на деформацию материала в клиновом зазоре, определяется произведением крутящего момента на угловую скорость вращения валка. Мощность привода валков рассчитывается по зависимостям, приведенным в работе [7].

При установке клина в промежуточных или калибрующем зазорах, вершина клина может располагаться либо в пределах зоны деформации первого межвалкового зазора, либо вне её.

В первом случае, определение энергосиловых параметров процесса. Аналогично рассмотренному ранее при условии, что давление в вершине клина равно давлению в сечении межвалкового зазора, соответствующем расположению вершины клина. Для реализации этого процесса необходимо лишь поддерживать такой объём материала в клиновом зазоре, чтобы его свободная поверхность располагалась на расстоянии от вершины клина, не меньше чем $x_{\text{к}}$.

Во втором случае избыточное давление в вершине клина равно нулю, и движение материала через клиновой зазор будет определяться равномерностью запитки клинового зазора

исходным материалом, величина которой должна строго соответствовать расходу V , обеспечиваемому межвалковыми зазорами валковой машины. При этом свободная поверхность материала в загрузочном клиновом зазоре должна располагаться на уровне сечения клинового зазора высотой h_H , определяемой из выражения [9] методом последовательных приближений:

$$V = \frac{W_{B1} h_H \left(\frac{1+n}{n} \right) \left[\left(\frac{h_H}{h_K} \right)^n - 1 \right]}{2 \left[\left(\frac{h_H}{h_K} \right)^{n+1} - 1 \right]}. \quad (10)$$

Таким образом, зная величину клинового зазора в вершине клина и объёмный расход материала (легко определяемый через производительность машины в целом), нетрудно определить положение зоны деформации клинового зазора, а, следовательно, и координату сечения зазора, на котором необходимо поддерживать уровень материала $x_K = (h_H - h_K) \operatorname{ctg} \alpha$.

Энергосиловые параметры процесса определяются по полученным выше формулам при условии замены в них величины δ величиной V/W_{B1} .

Количество теплоты Q_{BH} , которое необходимо подвести к валку, не образующему клиновой зазор, или отвести от него в процессе переработки, определяется по методике [7].

Для валка и клина, образующих клиновой зазор, уравнение энергетического баланса определяются из условия наличия или отсутствия системы теплоснабжения клина.

В случае наличия у клина системы теплоснабжения количество теплоты Q_M , затрачиваемое на изменение энтальпии материала при его контакте с валком, определится выражением:

$$Q_{MB} = \sum_i G c_p (T_{ki} - T_{hi}) + \sum_j G_B c_p (T_{kj} - T_{hj}) + \frac{3G c_p}{4} (T_{KKB} - T_{HKB}), \quad (11)$$

где i – количество участков валка, покрытых материалом и расположенных вне зазоров; j – количество межвалковых зазоров, образуемых данным валком.

Соответственно для клина:

$$Q_{MK} = \frac{G c_p}{4} (T_{KKK} - T_{HKK}). \quad (12)$$

Здесь T_{KKB} , T_{HKB} , T_{KKK} , T_{HKK} – соответственно конечные и начальные температуры материала при прохождении им клинового зазора со стороны валка и клина (они определяются как средние по соответствующим сечениям клинового зазора со стороны валка или клина); $3G/4$ – массовый расход материала, обеспечиваемый в клиновом зазоре валком и равный расходу материала через половину клинового зазора со стороны валка; $G/4$ – массовый расход материала, обеспечиваемый клином. При отсутствии у клина системы теплоснабжения количества теплоты Q_M для валка определится выражением:

$$Q_{MB} = \sum_i G c_p (T_{ki} - T_{hi}) + \sum_j G_B c_p (T_{kj} - T_{hj}) + G c_p (T_K - T_H), \quad (13)$$

где T_K и T_H – температуры материала на выходе из клинового зазора и входе в него.

Энергия диссипации, обеспечиваемая клином, определяется зависимостью:

$$Q_{\text{дисск}} = \frac{L K W_B^{n+1} \operatorname{ctg} \alpha}{h_H^{n-1}} \int_{0,5x_H}^1 \int_{0,5x_H}^{x_K} \left| -1 - (1+2n) \left(1 - \frac{2d}{h_H(1-x)} \right) \left(1 - \left(\frac{1+n}{n} \right) e^{\frac{1}{n}} \right) \right|^{n+1} \frac{1}{(1-x)^n} dx de. \quad (14)$$

Мощность диссипации, обеспечиваемая валком в клиновом зазоре, определяется аналогично, но при интегрировании выражения удельной энергии диссипации в интервале значений координаты ϵ от 0 до 0,5;

Определив тепловую нагрузку $Q_{\text{вн}}$ валков (и клина при наличии у него системы теплоснабжения), определяем скорость и температуру теплоносителя, циркулирующего в валках (и клине). Методика определения указанных параметров подробно рассмотрена в работах [7, 8].

Указанная методика была использована при проектировании на заводе «Большевик» (г. Киев, Украина) клинового устройства (индекс 989002) для универсального трёхвалкового каландра $3 \times 500 \times 1250$ (индекс 503078), предназначенного для переработки резиновых смесей.

Исходные данные для расчёта приведены ниже.

Перерабатываемый материал – резина шинного производства.

Реологические свойства резины:

| | |
|---|-------|
| – коэффициент консистенции, Па·с ⁿ | 80000 |
| – температура определения коэффициента консистенции, °С | 80 |
| – показатель степени реологического уравнения | 0,21 |
| – температурный коэффициент | 8,1 |

Теплофизические свойства резины:

| | |
|------------------------------------|-------|
| – массовая теплоёмкость, Дж/(кг·К) | 1850 |
| – плотность, кг/м ³ | 1400 |
| – теплопроводность, Вт/(м·К) | 0,175 |

Расстояние между ограничительными стрелами вальцов, м

1.1

Линейная скорость рабочей поверхности вала, образующего клиновой зазор, м/с

0,7

Толщина резины на выходе из межвалкового зазора, м

0,001...0,004

Угол клиновидности зазора, ...°

4...10

Высота клинового зазора в начале зоны деформации, м

0,01...0,03

Температура рабочей поверхности вала, °С

80

Температура рабочей поверхности клина, °С

50

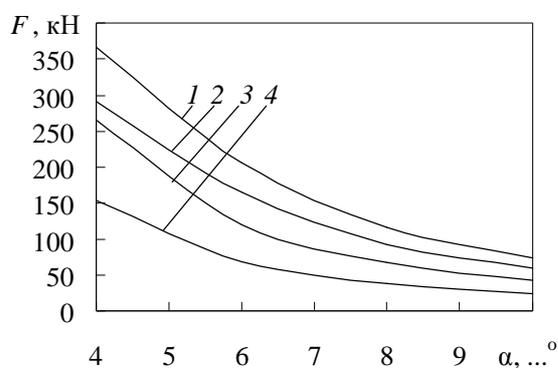
Начальная температура резины, °С

70

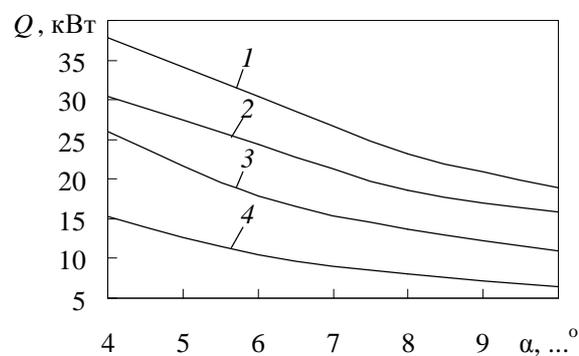
Максимально допустимая температура резины, °С

105

На основании многовариантного расчёта процесса каландрования было установлено, что максимальная длина дуги зоны деформации клинового сходящегося зазора не превышает 0,2 м, максимальное распорное усилие в клиновом зазоре – 37 т, максимальная мощность, потребляемая в клиновом зазоре, – 40 кВт (рис. 3), а локальная температура перерабатываемой композиции в зоне деформации – максимально допустимого значения.



а



б

Рис. 3. Зависимость распорных усилий (а) и мощности диссипации (б) в клиновом зазоре от угла клиновидности при различной толщине материала на выходе из межвалкового зазора δ , мм: 1 – 1; 2 – 2; 3 – 3; 4 – 4

ВЫВОДЫ

Анализ результатов численного моделирования позволил сделать следующие рекомендации для обеспечения рациональных режимов процесса каландрования с использованием клинового устройства:

1. Температура валка, образующего клиновой зазор, должна быть на 5–15 °С выше температуры рабочей поверхности клина и температуры валка, с которым рассматриваемый валок образует расположенный после клинового зазора межвалковый зазор.

2. Скорость валка, образующего клиновой зазор, для предотвращения термодеструкции перерабатываемого материала не должна превышать 0,60...0,65 м/с.

3. Угол клинового сходящегося зазора должен лежать в пределах 4...13 °, что соответственно объясняется необходимостью создания достаточной циркуляционной зоны и возможностью образования застойных зон перерабатываемого материала в клиновом зазоре.

4. Минимальная величина клинового зазора (величина клинового зазора в вершине клина) должна быть в пределах 2,01...2,36 величины межвалкового зазора. При значении минимальной величины клинового зазора менее 2,01 величины межвалкового зазора значительно увеличивается зона активного деформирования материала в клиновом зазоре, что приводит к росту распорных усилий и возможности термодеструкции перерабатываемого материала, а при значении более 2,36 величины межвалкового зазора использование клинового устройства становится нерациональным вследствие значительного уменьшения зоны активного деформирования материала в клиновом зазоре.

5. Глубина погружения клина в межвалковый зазор должна соответствовать безразмерной координате ψ в системе «валок – валок», равной 1,0...1,5. При большем погружении клина (уменьшении значения координаты ψ менее 1,0) становится неэффективным действие межвалкового зазора, а при большем извлечении клина (увеличении значения координаты ψ более 1,5) наблюдается режим неустойчивого питания перерабатываемым материалом межвалкового зазора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Меерсон В. Д. Клиновые устройства для валковых машин : [темам. обзор] / В. Д. Меерсон, В. Н. Красовский, А. Н. Воскресенский. – М. : ЦИИТЭнифтехим, 1980. – 48 с.
2. Интенсификация переработки полимерных материалов на валковых машинах при помощи клиновых устройств / В. Н. Красовский, Ю. Е. Лукач, Л. И. Ружинская и др. – К. : КПИ, 1988. – 39 с. – Деп. в УкрНИИИТИ 28.01.88, № 318-Ук. 88.
3. Клинові пристрої валкових машин. Інтенсифікація робочих процесів переробки гумових сумішей / Є. М. Кузяєв, І. І. Начовний, Є. О. Богуцька, М. С. Хорольський // Хімічна промисловість України. – 2006. – № 4. – С. 44–52.
4. Lomov A. A. Zur Berechnung integraler Parameter beim Kalandrieren von Polymerwerkstoffen mit Hilfe einer vibrierenden Keilspalteinrichtung / A. A. Lomov, G. M. Gontscharow, N. G. Bekin // Plaste und Kautschuk. – 1983. – № 5. – С. 270–273.
5. Воронин Л. Г. Математическое моделирование процесса переработки полимеров в клиновом сходящемся зазоре / Л. Г. Воронин, Ю. Е. Лукач, И. О. Микулёнок и др. – К. : КПИ, 1987. – 14 с. – Деп. в УкрНИИИТИ 04.01.87, № 57-Ук. 87.
6. Микулёнок И. О. Методика расчета процесса каландрования полимеров с использованием клиновых устройств / И. О. Микулёнок, С. А. Рошупкин. – К. : КПИ, 1991. – 23 с. – Деп. в УкрНИИИТИ 09.12.91, № 1586-Ук. 91.
7. Микулёнок И. О. Методика параметрического и теплового расчёта полимерперерабатывающих каландров / И. О. Микулёнок, Ю. Е. Лукач, Л. И. Ружинская. – К. : КПИ, 1990. – 31 с. – Деп. в УкрНИИИТИ 21.02.90, № 283-Ук. 90.
8. Автоматизированное проектирование валковых машин для переработки полимеров / [Ю. Е. Лукач, Л. Г. Воронин, Л. И. Ружинская и др.]. – К. : Техніка, 1988. – 208 с.
9. Торнер Р. В. Теоретические основы переработки полимеров (механика процессов) / Р. В. Торнер. – М. : Химия, 1977. – 464 с.

Микулёнок И. О. – д-р техн. наук, проф. НТУУ «КПИ».

НТУУ «КПИ» – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», г. Киев.

E-mail: i.mikulionok@kpi.ua