

УДК: 677.057

EDN: CIJFDW

DOI: [10.47813/2782-2818-2022-2-2-0129-0142](https://doi.org/10.47813/2782-2818-2022-2-2-0129-0142)



Контактные углы двухвалковых модулей

технологических машин

Ш.Р. Хуррамов, Ф.С. Холтураев

Ташкентский архитектурно-строительный институт, Ташкент, Узбекистан

Аннотация. Задачи контактного взаимодействия в двухвалковых модулях зависят главным образом от величины контактных углов, так как они определяют граничные условия этих задач. Определены контактные углы и условия для их оценки в установившемся процессе обобщенного двухвалкового модуля, в котором учтены всевозможные асимметрии взаимодействия слоя материала с парами валков технологических машин. Установлено, что сумма углов захвата при установившемся процессе не зависит от наклона подачи слоя материала относительно линии центров и от наклона верхнего валка относительно вертикали.

Ключевые слова: двухвалковый модуль, контактные задачи, контактные углы, установившийся процесс, асимметричные модули.

Для цитирования: Хуррамов, Ш., & Холтураев, Ф. (2022). Контактные углы двухвалковых модулей. *Современные инновации, системы и технологии - Modern Innovations, Systems and Technologies*, 2(2), 0129–0142. <https://doi.org/10.47813/2782-2818-2022-2-2-0129-0142>

Contact angles of two-roll modules of technological machines

Sh.R. Khurramov, F.S. Khalturaev

Tashkent Institute of Architecture and Civil Engineering, Tashkent, Republic of Uzbekistan

Abstract. The problems of the contact interaction of two-roll modules with the roller pairs depend mainly on the value of the angles of contact since they determine the boundary conditions of these problems. Contact angles and conditions for their evaluation are determined in the steady-state process of a generalized two-roll module, which takes into account all possible asymmetries of the interaction of a layer of material with pairs of rolls of technological machines. It is established that the sum of the capture angles during the steady-state process does not depend on the slope of the material layer feed relative to the line of centers and on the slope of the upper roll relative to the vertical.

Keywords: two-roll module, contact problems, contact angles, steady process, asymmetric modules.

For citation: Khurramov, Sh., & Khalturaev, F. (2022). Contact angles of two-roll modules. *Modern Innovations, Systems and Technologies*, 2(2), 0129–0142. <https://doi.org/10.47813/2782-2818-2022-2-0129-0142>

ВВЕДЕНИЕ

Валковые машины являются неотъемлемой частью большинства технологического оборудования легкой, текстильной, хлопкоочистительной, целлюлозно-бумажной, металлургической, пищевой, химической и других отраслей промышленности. Технологические процессы в двухвалковых модулях осуществляются в результате контактного взаимодействия слоя материала с парами валков. В связи с этим проблемы совершенствования существующих и разработки новых технологических процессов механической обработки материалов тесно связаны с явлениями контактного взаимодействия слоя материала с парами валков.

В работах [1-5] были решены контактные задачи взаимодействия слоя материала с парами валков двухвалковых модулей технологических машин.

Задачи контактного взаимодействия в двухвалковых модулях зависят главным образом от величины углов контакта нижнего и верхнего валков, так как они определяют граничные условия этих задач [6].

Несмотря на многочисленные работы [7-10], посвященные определению и оценке углов контакта в двухвалковых модулях, на сегодняшний день отсутствуют общепринятые модели углов начального контакта и углов выхода в асимметричных двухвалковых модулях. Некоторые из существующих моделей касаются только одного вида несимметричности двухвалкового модуля, в других рассматриваются совместно два вида несимметричности, однако модели, одновременно учитывающие все возможные виды несимметричности, отсутствуют. Именно поэтому решение задач контактного взаимодействия, например, задач моделирования закономерностей распределения контактных напряжений в асимметричном двухвалковом модуле, базируется на сегодняшний день в основном на данных, недостаточно полно отражающих процесс контактного взаимодействия и, часто, с учетом некорректно поставленных граничных условий.

МЕТОДЫ

Рассмотрим обобщенный двухвалковый модуль [4], в котором валки расположенные относительно вертикали с наклоном справа под углом β , имеют неравные диаметры ($D_1 \neq D_2$) и эластичные покрытия из материалов с различными жесткостями и коэффициентами трения ($f_1 \neq f_2$), при этом оба валка приводные. Слой материала имеет равномерную толщину δ_1 и подан с наклоном вниз относительно линии центров (линии, соединяющей центры вращения валков) под углом γ_1 , расстояния между валками равна h_1 .

Величины углов контакта двухвалковых модулей зависят от вида и расположения направляющего подвижного верхнего валка, которые могут быть спроектированы в основном по двум схемам [5]:

1. Направляющим подвижного валка является ползун, который перемещается вместе с валком по направляющей относительно станины.

2. Направляющим подвижного валка является рычаг, который связывает ось подвижного валка со станиной.

В двухвалковых машинах используются в основном валковые пары, где ползун подвижного валка перемещается по вертикальной линии и по линии центров. Валковые пары, где ползун перемещается по вертикали, обычно используются в многовалковых машинах.

В работах [10,11] были определены контактные углы в двухвалковых модулях, где ползун подвижного валка перемещается по вертикальной линии. Данная работа посвящена к определению и оценки углов контакта, где ползун подвижного валка перемещается по линии центров.

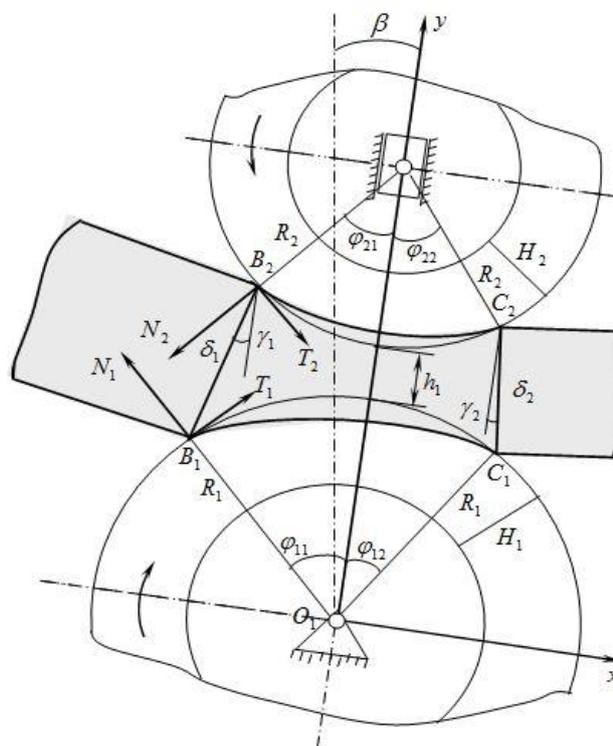


Рисунок 1. Схема взаимодействия в двухвалковом модуле.

Величины углов контакта в двухвалковых модулях также зависят от способа передачи движения валкам. Валковые пары по способу передачи движения валкам можно делить на приводные, имеющие механизм передачи, и свободные, получающие движение за счет сил трения, возникающих на поверхности контакта валков [4,10].

Свободные и приводные валки отличаются приложенными на них внешними силами, в результате контактными напряжениями, распределенными по контактными линиям под воздействием этих сил [10].

Пусть слой материала касается с валками в сечении B_1B_2 . Из рис. 1 следует, что

$$R_1(1 - \cos \varphi_{11}) + R_2(1 - \cos \varphi_{21}) + \delta_1(1 - \cos \gamma_1) + h_1 - \delta_1 = 0,$$

$$R_2 \sin \varphi_{21} = R_1 \sin \varphi_{11} - \delta_1 \sin \gamma_1,$$

В результате преобразования этих выражений, имеем

$$2R_1 \sin^2 \frac{\varphi_{11}}{2} + 2R_2 \sin^2 \frac{\varphi_{21}}{2} + 2\delta_1 \sin^2 \frac{\gamma_1}{2} + h_1 - \delta_1 = 0, \quad (1)$$

$$R_2 \sin \frac{\varphi_{21}}{2} \cos \frac{\varphi_{21}}{2} = R_1 \sin \frac{\varphi_{11}}{2} \cos \frac{\varphi_{11}}{2} - \delta_1 \sin \frac{\gamma_1}{2} \cos \frac{\gamma_1}{2}. \quad (2)$$

Приняв $\sin \frac{\varphi_{11}}{2} \approx \frac{\varphi_{11}}{2}$, $\cos \frac{\varphi_{11}}{2} \approx 1$, $\sin \frac{\varphi_{21}}{2} \approx \frac{\varphi_{21}}{2}$, $\cos \frac{\varphi_{21}}{2} \approx 1$, $\sin \frac{\gamma_1}{2} \approx \frac{\gamma_1}{2}$, $\cos \frac{\gamma_1}{2} \approx 1$,

представим равенства (1) и (2) в упрощенном виде

$$R_1 \varphi_{11}^2 + R_2 \varphi_{21}^2 + \delta_1 \gamma_1^2 + 2(h_1 - \delta_1) = 0, \quad (3)$$

$$\varphi_{21} = \frac{R_1}{R_2} \varphi_{11} - \frac{\delta_1}{R_2} \gamma_1. \quad (4)$$

После подстановки φ_{21} из равенства (3) и преобразований, уравнение (4) принимает вид

$$R_1(R_1 + R_2)\varphi_{11}^2 - 2R_1\delta_1\gamma_1\varphi_{11} + \delta_1^2\gamma_1^2 + R_2\delta_1\gamma_1^2 + 2R_2(h_1 - \delta_1) = 0.$$

Решая это квадратное уравнение, находим

$$\varphi_{11} = \frac{\delta_1\gamma_1}{R_1 + R_2} + \sqrt{\frac{2R_2(\delta_1 - h_1)}{R_1(R_1 + R_2)} - \frac{R_2\delta_1(\delta_1 + R_1 + R_2)\gamma_1^2}{R_1(R_1 + R_2)^2}}. \quad (5)$$

Расчеты по формуле (5) свидетельствуют о том, что величина второго члена под радикалом мало по сравнению с первым членом. На этом основании вторым членом можно пренебречь, придав формуле для определения угла контакта φ_{11} более простой вид

$$\varphi_{11} = \sqrt{\frac{2R_2(\delta_1 - h_1)}{R_1(R_1 + R_2)}} + \frac{\delta_1 \gamma_1}{R_1 + R_2}. \quad (6)$$

С учетом выражения (6) из равенства (4) находим выражения для определения угла контакта φ_{21} :

$$\varphi_{21} = \sqrt{\frac{2R_1(\delta_1 - h_1)}{R_2(R_1 + R_2)}} - \frac{\delta_1 \gamma_1}{R_1 + R_2}. \quad (7)$$

Из выражений (6) и (7) находим, что

$$\varphi_{11} + \varphi_{21} = \sqrt{\frac{2(R_1 + R_2)(\delta_1 - h_1)}{R_1 R_2}}. \quad (8)$$

Из равенства (8) следует, что сумма углов захвата при установившемся процессе не зависит от наклона подачи слоя материала относительно линии центров и от наклона верхнего валка относительно вертикали. Она увеличивается с увеличением начальной толщины слоя материала и уменьшением радиусов валков.

Составим уравнения равновесия сил в момент касания слоя материала с валками:

$$\begin{cases} \sum X = -N_{1x} - N_{2x} + T_{1x} + T_{2x} = 0, \\ \sum Y = N_{1y} - N_{2y} + T_{1y} - T_{2y} = 0. \end{cases} \quad (9)$$

Из схемы сил на рис. 1 находим

$$\begin{aligned} N_{1x} &= N_1 \sin \varphi_{11}, & T_{1x} &= T_1 \cos \varphi_{11}, & N_{1y} &= N_1 \cos \varphi_{11}, & T_{1y} &= T_1 \sin \varphi_{11}, \\ N_{2x} &= N_2 \sin \alpha_{21}, & T_{2x} &= T_2 \cos \alpha_{21}, & N_{2y} &= N_2 \cos \alpha_{21}, & T_{2y} &= T_2 \sin \alpha_{21}. \end{aligned} \quad (10)$$

С учетом этих выражений систему (9) перепишем в виде

$$\begin{cases} N_1 \sin \varphi_{11} - T_1 \cos \varphi_{11} = -(N_2 \sin \varphi_{21} - T_2 \cos \varphi_{21}), \\ N_1 \cos \varphi_{11} + T_1 \sin \varphi_{11} = N_2 \cos \varphi_{21} + T_2 \sin \varphi_{21}. \end{cases} \quad (11)$$

Преобразуем систему (11), выразив силы трения T_1 и T_2 через нормальные силы N_1 и N_2 согласно закону трения Амонтона-Кулона:

$$\frac{\sin \varphi_{11} - f_1 \cos \varphi_{11}}{\cos \varphi_{11} + f_1 \sin \varphi_{11}} = - \frac{\sin \varphi_{21} - f_2 \cos \varphi_{21}}{\cos \varphi_{21} + f_2 \sin \varphi_{21}}$$

или

$$\operatorname{tg}(\varphi_{11} + \varphi_{21}) = \frac{f_1 + f_2}{1 - f_1 f_2},$$

где f_1 , f_2 – коэффициенты трения нижнего и верхнего валков по слою материала.

Имея в виду, что $f_1 = tg v_{11}$ и $f_2 = tg v_{21}$ (где v_{11} и v_{21} – углы трения нижнего и верхнего валков по слою материала), окончательно имеем:

$$\varphi_{11} + \varphi_{21} = v_{11} + v_{21}. \quad (12)$$

Таким образом, в момент касания слоя материала с валками сумма углов контакта равняется сумме углов трения независимо от наклона верхнего валка к оси O_1y и от наклона слоя материала к оси O_1x .

С учетом равенства (12) выражение (8) имеет вид:

$$v_{11} + v_{21} = \sqrt{\frac{2(R_1 + R_2)(\delta_1 - h_1)}{R_1 R_2}}. \quad (13)$$

Откуда находим

$$\sqrt{2(\delta_1 - h_1)} = \sqrt{\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}} (v_{11} + v_{21}). \quad (14)$$

Подставляя это выражения в формулы (6) и (7), находим

$$\varphi_{11} = \frac{1}{R_1 + R_2} (R_2 (v_{11} + v_{21}) + \delta_1 \gamma_1), \quad \varphi_{21} = \frac{1}{R_1 + R_2} (R_1 (v_{11} + v_{21}) - \delta_1 \gamma_1). \quad (15)$$

Анализ зависимостей (15) показал, что с увеличением углов трения нижнего и верхнего валков по слою материала и их суммы углы начального контакта линейно увеличиваются.

Углы захвата оценивают условием захвата, согласно которому, возможность захвата слоя материала парами валков зависит от соотношения втягивающих и заталкивающих сил [10].

В установившемся процессе в точках B_1 и B_2 со стороны валков на слой материала действуют силы нормального давления N_1 , N_2 и силы трения T_1 , T_2 . Силы трения направлены так, что они стремятся втянуть слой материала в зазор между валками, а силы нормальных давлений препятствуют этому. Очевидно, возможность захвата зависит от соотношения втягивающих и отталкивающих сил. Для осуществления захвата необходимо, чтобы составляющие сил трения по оси перпендикулярной к линии центров T_{1x} и T_{2x} были больше составляющих сил нормальных давлений по оси вертикальной линии центров N_{1x} и N_{2x} или, в крайнем случае, равны им. Математически это условие формулируется как:

$$N_{1x} + N_{2x} \leq T_{1x} + T_{2x}. \quad (16)$$

В дополнение к условию (16) составим уравнение равновесия сил по оси O_{1y}

$$N_{1y} - N_{2y} + T_{1y} - T_{2y} = 0. \quad (17)$$

Совместным решением неравенства (16) и равенства (17) по аналогии решению системы (11), получим

$$\varphi_{11} + \varphi_{21} \leq v_{11} + v_{21}. \quad (18)$$

Это неравенство определяет условие захвата в установившемся процессе для обобщенного двухвалкового модуля, представленного на рис. 1, когда оба валка приводные. Таким образом, чтобы произошел захват слоя материала валками, сумма углов захвата в установившемся процессе должна быть меньше суммы углов трения или, по крайней мере, равна ему.

С учетом неравенства (18) из формул (6) и (7), находим

$$\varphi_{11} \leq \frac{1}{R_1 + R_2} (R_2(v_1 + v_2) + \delta_1 \gamma_1), \quad \varphi_{21} \leq \frac{1}{R_1 + R_2} (R_1(v_1 + v_2) - \delta_1 \gamma_1). \quad (19)$$

Таким образом, в установившемся процессе при свободном захвате слоя материала с двумя приводными валками углы контакта оцениваются неравенствами (19).

Если не выполняется условие (18), тогда не произойдет захват слоя материала валками. В этом случае захват слоя материала осуществляется с помощью заталкивающей силы U .

Углы конечного контакта валков φ_{12} и φ_{22} определяем аналогично углам начального контакта.

Они имеют вид:

$$\varphi_{12} = \frac{1}{R_1 + R_2} (R_2(v_{12} + v_{22}) + \delta_2 \gamma_2), \quad \varphi_{22} = \frac{1}{R_1 + R_2} (R_1(v_{12} + v_{22}) - \delta_2 \gamma_2). \quad (20)$$

где v_{12} , v_{22} – углы трения в точках C_1 и C_2 , соответственно, δ_2 – толщина слоя материала при выходе из зоны контакта валков, γ_2 – угол наклона слоя материала относительно линии центров при выходе из зоны контакта.

Проведенный анализ геометрических условий взаимодействия слоя материала с парами валков позволил найти углы контакта двухвалкового модуля с двумя приводными валками. Эти формулы являются общими, так как они определяют углы контакта для всех частных случаев взаимодействия слоя материала с двумя приводными валками.

Пусть, теперь в рассматриваемом двухвалковом модуле верхний вал будет свободным (рис. 2).

Аналогично формулам (6) и (7), находим

$$\varphi_{11} = \sqrt{\frac{2R_2(\delta_1 - h_1)}{R_1(R_1 + R_2)}} + \frac{\delta_1\gamma_1}{R_1 + R_2},$$

$$\varphi_{21} = \sqrt{\frac{2R_1(\delta_1 - h_1)}{R_2(R_1 + R_2)}} - \frac{\delta_1\gamma_1}{R_1 + R_2}.$$

(21)

В исследовании двухвалковых модулей с одним приводным валком важное значение имеет критический угол наклона слоя материала относительно линии центров [4].

Критический угол наклона слоя материала в рассматриваемом двухвалковом модуле — это угол $\gamma_{кpy} = \varphi_{21}$, то есть

$$\gamma_{кpy} = \sqrt{\frac{2R_1(\delta_1 - h_1)}{R_2(R_1 + R_2)}} - \frac{\delta_1\gamma_1}{R_1 + R_2}. \quad (22)$$

При критическом наклоне слоя материала угол захвата нижнего валка в установившемся процессе имеет вид:

$$\varphi_{1кpy} = \frac{\delta_1 + R_2}{\delta_1 + R_1 + R_2} \sqrt{\frac{2(\delta_1 - h_1)(R_1 + R_2)}{R_1 R_2}}. \quad (23)$$

Составим уравнения равновесия сил слоя материала в момент касания с валками в установившемся процессе согласно рис. 2:

$$\begin{cases} \sum X = -N_{1x} - N_{2x} + T_{1x} - T_{2x} = 0, \\ \sum Y = N_{1y} - N_{2y} + T_{1y} + T_{2y} = 0 \end{cases}$$

или с учетом выражений (10)

$$\begin{cases} N_1 \sin \varphi_{11} - T_1 \cos \varphi_{11} = -(N_2 \sin \varphi_{21} + T_2 \cos \varphi_{21}), \\ N_1 \cos \varphi_{11} + T_1 \sin \varphi_{11} = N_2 \cos \varphi_{21} - T_2 \sin \varphi_{21}. \end{cases} \quad (24)$$

Величину силы трения T_2 , можно определить из равенства [10]:

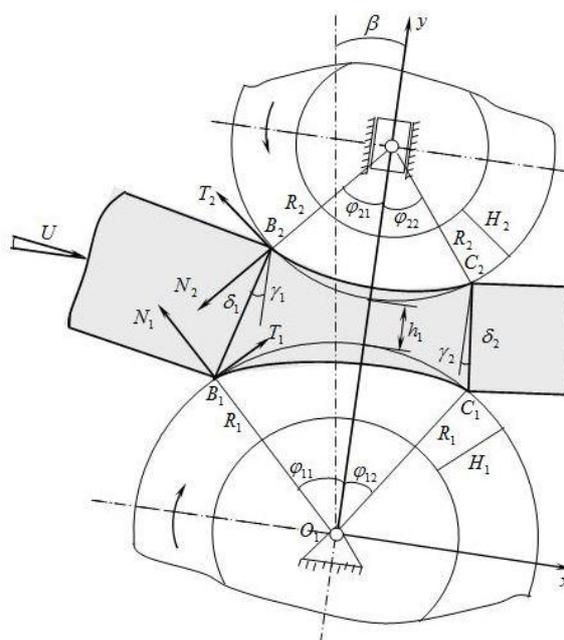


Рисунок 2. Схема взаимодействия в двухвалковом модуле с одним приводным валком.

$$M_{\text{ш}} = T_{\text{ш}} r_{\text{ш}} = N_2 f_{\text{ш}} r_{\text{ш}} = T_2 R_2,$$

где $M_{\text{ш}}$ – момент, создаваемый силами трения в шейках свободного валка; $T_{\text{ш}}$ – равнодействующая сил трения в шейках; $r_{\text{ш}}$ – радиус шейки свободного валка; $f_{\text{ш}}$ – коэффициент трения в шейках.

Находим $T_2 = N_2 f_{\text{ш}} \frac{r_{\text{ш}}}{R_2}$. После подстановки этого значения T_2 и $T_1 = f_1 N_1$

в систему (24) и совместного решения уравнений получим:

$$\operatorname{tg}(\varphi_{11} + \varphi_{21}) = \frac{f_1 - f_{\text{ш}} \frac{r_{\text{ш}}}{R_2}}{1 + f_1 f_{\text{ш}} \frac{r_{\text{ш}}}{R_2}}.$$

Допустим, что $\frac{r_{\text{ш}}}{R_2} f_{\text{ш}} = \frac{r_{\text{ш}}}{R_2} \operatorname{tg} \nu_{\text{ш}} = \operatorname{tg} \left(\nu_{\text{ш}} \frac{r_{\text{ш}}}{R_2} \right)$, где $\nu_{\text{ш}}$ – угол трения в шейках.

Тогда можно записать:

$$\frac{f_1 - f_{\text{ш}} \frac{r_{\text{ш}}}{R_2}}{1 + f_1 f_{\text{ш}} \frac{r_{\text{ш}}}{R_2}} = \frac{\operatorname{tg} \nu_1 - \operatorname{tg} \left(\nu_{\text{ш}} \frac{r_{\text{ш}}}{R_2} \right)}{1 + \operatorname{tg} \nu_1 \operatorname{tg} \left(\nu_{\text{ш}} \frac{r_{\text{ш}}}{R_2} \right)} = \operatorname{tg} \left(\nu_1 - \nu_{\text{ш}} \frac{r_{\text{ш}}}{R_2} \right).$$

Следовательно, имеем:

$$\varphi_{11} + \varphi_{21} = \nu_1 - \nu_{\text{ш}} \frac{r_{\text{ш}}}{R_2}. \quad (25)$$

С учетом равенства (25) из равенства (21) с учетом равенства (8), имеем

$$\varphi_{11} = \frac{1}{R_1 + R_2} \left(R_2 \left(\nu_{11} - \nu_{\text{ш}} \frac{r_{\text{ш}}}{R_2} \right) + \delta_1 \gamma_1 \right), \quad \varphi_{21} = \frac{1}{R_1 + R_2} \left(R_1 \left(\nu_{11} - \nu_{\text{ш}} \frac{r_{\text{ш}}}{R_2} \right) - \delta_1 \gamma_1 \right), \quad (26)$$

Аналогично, имеем

$$\varphi_{12} = \frac{1}{R_1 + R_2} \left(R_2 \left(\nu_{12} - \nu_{\text{ш}} \frac{r_{\text{ш}}}{R_2} \right) + m_1 \delta_1 \gamma_1 \right), \quad \varphi_{22} = \frac{1}{R_1 + R_2} \left(R_1 \left(\nu_{12} - \nu_{\text{ш}} \frac{r_{\text{ш}}}{R_2} \right) - m_1 \delta_1 \gamma_1 \right). \quad (27)$$

В момент начального соприкосновения слоя материала с валками свободный валок не оказывает втягивающего действия на слой материала. Более того, свободный валок в некоторой мере противодействует втягиванию слоя из-за сопротивления вращению в его опорах. Сформулируем условие свободного захвата в виде

$$N_{1x} + N_{2x} + T_{2x} \leq T_{1x}. \quad (28)$$

Решив неравенства (28) совместно со вторым уравнением системы (24), находим условие захвата в установившемся процессе двухвалкового модуля с одним приводным валком

$$\varphi_{11} + \varphi_{21} \leq v_{11} - v_{ш} \frac{r_{ш}}{R_2}. \quad (29)$$

На основе зависимостей (27) и (28) находим выражения для оценки углов контакта в установившемся процессе двухвалкового модуля с одним приводным валком:

$$\varphi_{11} \leq \frac{1}{R_1 + R_2} \left(R_2 \left(v_{11} - v_{ш} \frac{r_{ш}}{R_2} \right) + \delta_1 \gamma_1 \right), \quad \varphi_{21} \leq \frac{1}{R_1 + R_2} \left(R_1 \left(v_{11} - v_{ш} \frac{r_{ш}}{R_2} \right) - \delta_1 \gamma_1 \right). \quad (30)$$

Сравнивая условия (19) с условиями (30), приходим к выводу, что в двухвалковом модуле с одним приводным валком захват осуществляется значительно более трудно, чем при двухвалковых модулях с двумя приводными валками.

Так как в большинстве случаев в двухвалковых модулях валки устанавливаются в подшипниках качения, где величина трения невелика, то вследствие этого силой трения T_2 можно пренебречь по сравнению с другими силами, действующими на валок [10].

Тогда условие захвата будет

$$\varphi_{11} + \varphi_{21} \leq v_{11}. \quad (31)$$

Таким образом, если допустить, что сопротивление вращению в шейках свободного вала отсутствует, то сумма максимальных углов захвата в двухвалковых модулях с одним приводным валком будет в два раза меньше, чем с двумя приводными валками.

Сравним максимальные толщины слоя, который может быть захвачен валками двухвалкового модуля при наличии приводного и свободного верхнего вала. Будем считать, что валки двухвалкового модуля в момент захвата располагаются без зазора, то есть $h_1 = 0$.

Из выражения (14) для двухвалкового модуля с двумя приводными валками, когда $h_1 = 0$, имеем

$$\delta_{1\max}^n = \frac{R_1 R_2}{2(R_1 + R_2)} (v_{11} + v_{21})^2. \quad (32)$$

Аналогично находим с учетом выражения (32) для двухвалкового модуля с верхним свободным валком:

$$\delta_{1\max}^c = \frac{R_1 R_2}{2(R_1 + R_2)} v_{11}^2.$$

Найдем отношение

$$\frac{\delta_{1\max}^n}{\delta_{1\max}^c} = \frac{(v_{11} + v_{21})^2}{v_{11}^2}.$$

Откуда, когда $v_{11} = v_{21}$, имеем, что $\frac{\delta_{1\max}^n}{\delta_{1\max}^c} = 4$.

Таким образом, максимальная толщина слоя материала, который может быть захвачен валками двухвалкового модуля при свободном верхнем валке, почти в четыре раза меньше, чем при приводном валке.

Когда коэффициент трения в шейках свободного валка равен нулю, чтобы выполнялось вращение свободного валка слоем материала, линия, являющаяся продолжением переднего конца слоя материала, должна пройти через ось вращения свободного валка. Для осуществления захвата при таком расположении слоя и отсутствии трения в шейках не требуются никаких дополнительных внешних заталкивающих сил [10].

Пусть линия, являющаяся продолжением переднего конца слоя материала, пройдет через ось вращения свободного валка. При этом угол наклона слоя материала к оси O_1x равняется критической $\gamma_{кр}$, которая определяется формулой (22). В критическом наклоне слоя материала угол контакта нижнего валка определяется формулой (23).

При наличии трения в шейках свободного валка или при произвольном наклоне слоя материала относительно оси O_1x условия вращения слоя свободного верхнего валка не будут выполняться, и поэтому для осуществления захвата обязательно требуются внешняя заталкивающая сила.

Таким образом, получены углы контакта в установившемся процессе двухвалкового модуля с одним приводным валком, которые определяются формулами (27) и (28). Они оцениваются условиями (31). Эти формулы являются общими. Так как они определяют углы контакта для всех частных случаев взаимодействия слоя материала с парами валков в двухвалковом модуле с одним приводным валком.

РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Определены контактные углы и условия для их оценки в установившемся процессе обобщенного двухвалкового модуля, в котором учтены всевозможные асимметричности взаимодействия слоя материала с парами валков технологических машин.

2. Получены аналитические формулы для определения контактных углов в обобщенном двухвалковом модуле в случаях, когда оба валка приводные и когда верхний валок свободный. Эти формулы являются общими, так как они определяют углы контакта для всех частных случаев взаимодействия слоя материала с парами валков в двухвалковом модуле технологических машин.

ВЫВОДЫ

На основе анализа расчетов по полученным формулам контактных углов выявлено следующее:

- сумма углов захвата при установившемся процессе не зависит от наклона подачи слоя материала относительно линии центров и от наклона верхнего валка относительно вертикали;
- сумма углов контакта равняется сумме углов трения независимо от наклона верхнего валка к оси ординат и от наклона слоя материала к оси абсцисс;
- с увеличением углов трения нижнего и верхнего валков по слою материала и их суммы углы начального контакта линейно увеличиваются;
- в двухвалковом модуле с одним приводным валком захват осуществляется значительно более трудно, чем при двухвалковых модулях с двумя приводными валками;
- максимальная толщина слоя материала, который может быть захвачен валками двухвалкового модуля, при свободном верхнем валке почти в четыре раз меньше, чем при приводном валке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Хуррамов Ш.Р. Аналитическое описание формы кривых контакта валков в двухвалковом модуле, *Известия вузов. Технология текстильной промышленности*. 2021, 4(394), 153-158.

- [2] Alexa V., Ratiu S.A., Kiss I, Ciota G. Modelling pressure rolling of asymmetric rolling Process, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2017, 200, 012038.
- [3] Khurramov Sh.R., Abdugarimov A., Khalturayev F.S., Kurbanova F.Z. Modeling of friction forces in an asymmetric two-roll module, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2020, 916, 012051 doi:10.1088/1557-899X/916/1/012051.
- [4] Xingdong Li. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2017, 269, 012053. doi:10.1088/1757-899X/269/1/ 012053.
- [5] Tolcha M. A., Altenbach H. Numerical Modeling Rolling Contact Problem and Elasticity Deformation of Rolling Die under Hot Milling, *Metals*. 2019, 9, 226. doi:10.3390/met9020226.
- [6] Грудев А.П. *Захватывающая способность прокатных валков*. М.: «СП Интернет Инжиниринг», 1998, 283 с.
- [7] Максименко О.П., Никулин А.А., Романюк Р.Я. Теоретический анализ захватывающей способности валков в установившемся режиме прокатки, *Известия вузов: черная металлургия*. 2008, 10, 32-34.
- [8] Khurramov Sh.R., Abdugarimov A., Khalturayev F.S., Kurbanova F.Z. Modeling of friction stress in twin roll modules, *Journal of Physics: Conference Series*. 2021, 1789, 012008. doi:10.1088/1742-6596/1789/1/012008.
- [9] Kuznetsov G.K. *Research and methodology for the design of roller squeezing devices for textile machines*: Dis. ... doct. tech. sciences. Kostroma: KTI, 1970, 287 с.
- [10] Курбанова Ф.З. Исследование контактного взаимодействия в валковых парах для совершенствования процессов механической обработки листовых материалов: Дис... канд. техн. наук. Ташкент, 2022, 133 с.
- [11] Khalturaev F.S, Misirov M.U. Analysis of the angles of contact in a two-roll module, *Journal of Physics: Conference Series*. 2021, 1889, 042024. doi:10.1088/1742-6596/1789/4/ 042024

REFERENCES

- [1] Xurramov Sh.R. Analiticheskoye opisaniye formy krivyykh kontakta valkov v dvuhvalkovom module, *Izvestiya vysshix uchebnykh zavedeniy, Tekhnologiya tekstil'noy Promyshlennosti*. 2021, 4(394), 153-158.
- [2] Alexa V., Ratiu S.A., Kiss I, Ciota G. Modelling pressure rolling of asymmetric rolling Process, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2017, 200, 012038.
- [3] Khurramov Sh.R., Abdugarimov A., Khalturayev F.S., Kurbanova F.Z. Modeling of friction forces in an asymmetric two-roll module, *IOP Conf. Series: Materials Science and*

- Engineering*. 2020, 916, 012051 doi:10.1088/1557-899X/916/1/012051.
- [4] Xingdong Li. *IOP Conf.Series: Materials Science and Engineering*. 2017, 269, 012053. doi:10.1088/1757-899X/269/1/ 012053.
- [5] Tolcha M. A., Altenbach H. Numerical Modeling Rolling Contact Problem and Elasticity Deformation of Rolling Die under Hot Milling, *Metals*. 2019, 9, 226. doi:10.3390/met9020226.
- [6] Grudev A.P. *Zaxvatyvayushaya sposobnost prokatnyh valkov*. М.: «SP Internet Injineriing», 1998, 283 s.
- [7] Maksimenko O.P., Nikulin A.A. Romanyuk R.Ya. *Teoreticheskiy analiz zaxvatyvayushey sposobnosti valkov v ustanovivshemsya rejime prokatki*, *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*. 2008, 10, 32-34.
- [8] Khurramov Sh.R., Abdukarimov A., Khalturayev F.S., Kurbanova F.Z. Modeling of friction stress in twin roll modules, *Journal of Physics: Conference Series*. 2021, 1789, 012008. doi:10.1088/1742-6596/1789/1/012008.
- [9] Kuznetsov G.K. Research and methodology for the design of roller squeezing devices for textile machines: Dis. ... doct. tech. sciences. Kostroma: KTI, 1970, 287 c.
- [10] Kurbanova F.Z. Issledovaniye kontaktnogo vzaimodeystviya v valkovyx parax dlya sovershenstvovaniya protsessov mexanicheskoy obrabltki listovyh materialov: Dis... kand. texn. nauk. – Tashkent, 2022, 133 s.
- [11] Khalturaev F.S, Misirov M.U. Analysis of the angles of contact in a two-roll module, *Journal of Physics: Conference Series*. 2021, 1889, 042024. doi:10.1088/1742-6596/1789/4/042024

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Хуррамов Шавкат Рахматуллаевич,
к.т.н, доцент, Ташкентский
архитектурно-строительный институт,
Ташкент, Республика Узбекистан
e-mail: shavkat-xurramov59@mail.ru

Khurramov Shavkat Rakhmatullaevich,
Ph.D., Ass. Prof, Tashkent Institute of
Architecture and Civil Engineering,
Tashkent, Republic of Uzbekistan
e-mail: shavkat-xurramov59@mail.ru

Холтураев Фарход Сафарович,
Ph.D., доцент, Ташкентский
архитектурно-строительный институт,
Ташкент, Республика Узбекистан
e-mail: fedya-spets@mail.ru

Khalturaev Farkhad Safarovich,
Ph.D., Ass. Prof, Tashkent Institute of
Architecture and Civil Engineering,
Tashkent, Republic of Uzbekistan
e-mail: fedya-spets@mail.ru

Статья поступила в редакцию 16.04.2022; одобрена после рецензирования 25.04.2022; принята к публикации 21.06.2022.

The article was submitted 16.04.2022; approved after reviewing 25.04.2022; accepted for publication 21.06.2022.