

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ЗАХВАТА В АСИММЕТРИЧНОМ ДВУХВАЛКОВОМ МОДУЛЕ

### THEORETICAL ANALYSIS OF THE CONDITIONS OF CAPTURE IN AN ASYMMETRIC TWO-ROLL MODULE

Ш.Р. ХУРРАМОВ, Ф.С. ХАЛТУРАЕВ, Ф.З. КУРБАНОВА

SH.R. KHURRAMOV, F.S. KHALTURAEV, F.Z. KURBANOVA

(Ташкентский архитектурно-строительный институт, Республика Узбекистан,  
Институт механики и сейсмостойкости сооружений  
им.М.Т.Уразбаева АН Республики Узбекистан)

(Tashkent Institute of Architecture and Civil Engineering, Republic of Uzbekistan,  
Institute of Mechanics and Seismic Resistance of Structures  
named after M.T. Urazbaev of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan)

E-mail: shavkat-xurramov59@mail.ru

*В статье приведены результаты анализа условий захвата в асимметричном двухвалковом модуле. Выявлено, что сумма углов контакта в двухвалковом модуле не зависит от наклона подачи слоя материала к линии центров и наклона валков относительно вертикали.*

*The article presents the results of the analysis of the gripping condition in an asymmetric two-roll module. It was found that the sum of the contact angles in the two-roll module does not depend on the inclination of the material layer feeding to the center line and the inclination of the rolls relative to the vertical.*

**Ключевые слова:** двухвалковый модуль, условия захвата, углы контакта, угла захвата.

**Keywords:** two-roll module, capture conditions, contact angles, capture angles.

Технологические процессы в двухвалковом модуле осуществляются в результате контактного взаимодействия валков с обрабатываемым материалом. Задачи контактного взаимодействия двухвалкового модуля зависят главным образом от величины углов контакта, так как они определяют граничные условия этих задач. Углы контакта находят на основе анализа условий захвата в двухвалковом модуле.

Двухвалковые модули относятся к основным рабочим органам валковой машины или выполняют вспомогательные функции. В связи с этим многие из них являются асимметричными. При этом достаточно часто одновременно реализуется не-

сколько видов несимметричности, например, два вида геометрической несимметричности – разные диаметры и наклон слоя материала относительно линии центров (прямой, соединяющий центры валков).

В настоящее время известно достаточно много работ [1], [2], посвященных теоретическому анализу условий захвата в симметричном двухвалковом модуле. Имеются работы [3], [4], в которых исследуется один или несколько видов несимметричности в двухвалковом модуле. Однако в настоящее время комплексное исследование, одновременно учитывающее все возможные виды несимметричности при анализе условий захвата в двухвалковом модуле, отсутствует.

В целях дальнейшего развития теоретических представлений, анализируем условия захвата в асимметричном двухвалковом модуле, в котором реализуются одновременно геометрические (разные диаметры, наклон валков относительно вертикали, наклон слоя материала относительно линии центров), кинематические (один валок приводной, а второй свободный) и трибологические (разные коэффициенты трения) несимметричности.

Объектом анализа служит обобщенный двухвалковый модуль [5], в котором валки

$$R_1(1 - \cos \alpha_1) + R_2(1 - \cos \alpha_2) + \delta_1(1 - \cos \gamma) + h - \delta = 0, \quad (1)$$

$$R_2 \sin \alpha_2 = R_1 \sin \alpha_1 - \delta \sin \gamma, \quad (2)$$

где  $\alpha_1, \alpha_2$  – угол контакта нижнего и верхнего валка соответственно;  $R_1, R_2$  – радиус

расположены относительно вертикали наклоном справа под углом  $\beta$ , имеют неравные диаметры и коэффициенты трения по слою материала. Нижний валок приводной, а верхний – свободный. Слой материала имеет равномерную толщину  $\delta$  и подан наклоном вниз относительно линии центров под углом  $\gamma$  (рис. 1).

В сечении  $A_1A_2$  (в момент касания слоя материала с валками) имеют место равенства:

нижнего и верхнего валка соответственно;  $h$  – расстояние между валками.

В результате преобразований получим:

$$2R_1 \sin^2 \frac{\alpha_1}{2} + R_2 \sin^2 \frac{\alpha_2}{2} + \delta \sin^2 \frac{\gamma}{2} + h - \delta = 0, \quad (3)$$

$$R_2 \sin \frac{\alpha_2}{2} \cos \frac{\alpha_2}{2} = R_1 \sin \frac{\alpha_1}{2} \cos \frac{\alpha_1}{2} - \delta \sin \frac{\gamma}{2} \cos \frac{\gamma}{2}. \quad (4)$$

Приняв  $\sin \frac{\alpha_1}{2} \approx \frac{\alpha_1}{2}$ ,  $\cos \frac{\alpha_1}{2} \approx 1$ ,  $\sin \frac{\alpha_2}{2} \approx \frac{\alpha_2}{2}$ ,

$\cos \frac{\alpha_2}{2} \approx 1$ ,  $\sin \frac{\gamma}{2} \approx \frac{\gamma}{2}$ ,  $\cos \frac{\gamma}{2} \approx 1$  (при этом погрешность вычислений не превышает 1,0...1,5%), представим равенства (3) и (4) в упрощенном виде:

$$R_1 \alpha_1^2 + R_2 \alpha_2^2 + \delta \gamma^2 + 2(h - \delta) = 0, \quad (5)$$

$$R_2 \alpha_2 = R_1 \alpha_1 - \delta \gamma. \quad (6)$$

Решая совместно равенства (5) и (6), находим:

$$\alpha_1 = \frac{\delta \gamma}{R_1 + R_2} + \sqrt{\frac{2R_2(\delta - h)}{R_1(R_1 + R_2)} - \frac{R_2 \delta (\delta + R_1 + R_2) \gamma^2}{R_1(R_1 + R_2)^2}}. \quad (7)$$

Расчеты по формуле (7) свидетельствуют о том, что величина второго члена под радикалом мала по сравнению с первым членом. На этом основании вторым членом можно пренебречь (при этом погрешность вычислений не превышает 1,2...3,6%), придав формуле для определения угла  $\alpha_1$  более простой вид:

$$\alpha_1 = \sqrt{\frac{2R_2(\delta - h)}{R_1(R_1 + R_2)}} + \frac{\delta \gamma}{R_1 + R_2}. \quad (8)$$

С учетом выражения (8) из равенства (6) находим формулу для определения угла  $\alpha_2$ :

$$\alpha_2 = \sqrt{\frac{2R_1(\delta - h)}{R_2(R_1 + R_2)}} - \frac{\delta \gamma}{R_1 + R_2}. \quad (9)$$

Сложив выражения (8) и (9), после преобразований находим сумму углов  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ :

$$\alpha_1 + \alpha_2 = \sqrt{\frac{2(R_1 + R_2)(\delta - h)}{R_1 R_2}}. \quad (10)$$

Анализ результатов расчета по формулам (8)...(10) показал, что:

- с возрастанием  $R_2$  и  $\gamma$  угол  $\alpha_1$  увеличивается, а угол  $\alpha_2$  уменьшается;

- с увеличением  $R_1$  угол  $\alpha_1$  уменьшается, а угол  $\alpha_2$  увеличивается;

- закономерности изменения  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  от параметров  $\delta$  и  $h$  одинаковые;

- сумма углов контакта не зависит от параметров  $\beta$  и  $\gamma$ .

Оцениваем углы контакта с учетом сил, действующих на слой материала в сечении  $A_1A_2$ .

В точках  $A_1$  и  $A_2$  со стороны валков на слой материала действуют силы нормального давления  $N_1$ ,  $N_2$  и силы трения  $T_1$ ,  $T_2$ . Возможность захвата зависит от соотношения стягивающих и отталкивающих сил. Для осуществления захвата необходимо, чтобы составляющие сил трения  $T_{1x}$  и  $T_{2x}$  были больше составляющих сил нормальных давлений  $N_{1x}$  и  $N_{2x}$  или, в крайнем случае, равны им [1].

Математически это условие формулируется следующим образом:

$$N_{1x} + N_{2x} + T_{2x} \leq T_{1x}. \quad (11)$$

В дополнение к условию захвата составим уравнение равновесия сил по оси  $Oy$ :

$$N_{1y} - N_{2y} + T_{1y} + T_{2y} = 0. \quad (12)$$

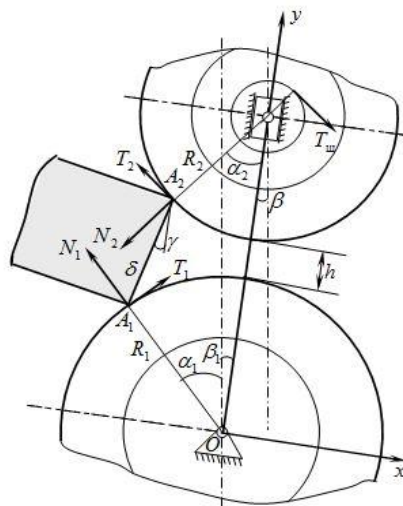


Рис. 1

Из схемы сил на рис. 1 (схема сил при захвате в двухвалковом модуле) находим:

$$\begin{aligned} N_{1x} &= N_1 \sin \alpha_1, \quad T_{1x} = T_1 \cos \alpha_1, \quad N_{1y} = N_1 \cos \alpha_1, \quad T_{1y} = T_1 \sin \alpha_1, \\ N_{2x} &= N_2 \sin \alpha_2, \quad T_{2x} = T_2 \cos \alpha_2, \quad N_{2y} = N_2 \cos \alpha_2, \quad T_{2y} = T_2 \sin \alpha_2. \end{aligned} \quad (13)$$

С учетом этих выражений неравенства (11) и равенства (12) перепишем в виде:

$$N_2 \sin \alpha_2 + T_2 \cos \alpha_2 \leq T_1 \cos \alpha_1 - N_1 \sin \alpha_1, \quad (14)$$

$$N_1 \cos \alpha_1 + T_1 \sin \alpha_1 = N_2 \cos \alpha_2 - T_2 \cos \alpha_2. \quad (15)$$

Для определения силы трения приводного нижнего валка используем закон трения Амонтона-Кулона  $T_1 = f_1 N_1$ , а для силы трения свободного верхнего валка выражение  $T_2 = f_2 N_2$  [1], где  $f_1$  – коэффициент трения приводного нижнего валка по слою материала;  $f_2 = f_{ш} \frac{r_{ш}}{R_2}$  – коэффициент трения

свободного верхнего валка по слою материала;  $r_{ш}$  – радиус шейки;  $T_{ш}$  – равнодействующая сил трения в шейках;  $f_{ш}$  – коэффициент трения в шейках.

Подставим значения  $T_1$  и  $T_2$  в неравенство (14) и равенство (15):

$$N_2 (\sin \alpha_2 + f_2 \cos \alpha_2) \leq N_1 (f_1 \cos \alpha_1 - \sin \alpha_1), \quad (16)$$

$$N_1 (\cos \alpha_1 + f_1 \sin \alpha_1) = N_2 (\cos \alpha_2 - f_2 \cos \alpha_2). \quad (17)$$

Из равенства (17) определим  $N_2$  и подставим ее в условие (16). После сокращений и преобразований находим  $\operatorname{tg}(\alpha_1 + \alpha_2) \leq \frac{f_1 - f_2}{1 + f_1 f_2}$ . Учтем, что  $\frac{f_1 - f_2}{1 + f_1 f_2} = \frac{\operatorname{tg}v_1 - \operatorname{tg}v_2}{1 + \operatorname{tg}v_1 \operatorname{tg}v_2}$ , где  $v_1$  – угол трения приводного нижнего валка;  $v_2$  – угол трения свободного верхнего валка.

Следовательно, условие захвата в рассматриваемом двухвалковом модуле можно представить в виде

$$\alpha_1 + \alpha_2 \leq v_1 - v_2,$$

или

$$\alpha_1 + \alpha_2 \leq v_1 - v_{\text{ш}} \frac{r_{\text{ш}}}{R_2}. \quad (18)$$

С учетом выражения (10) из неравенства (18) имеем:

$$\sqrt{\frac{2(R_1 + R_2)(\delta - h)}{R_1 R_2}} \leq v_1 - v_{\text{ш}} \frac{r_{\text{ш}}}{R_2}. \quad (19)$$

Как видно, условия захвата в рассматриваемом двухвалковом модуле определяются радиусами валков, расстоянием между валками и коэффициентами трения валков по слою материала. Они не зависят от наклона подачи слоя материала к линии центров и от наклона валков относительно вертикали.

С учетом неравенства (19) из зависимостей (8) и (9) находим:

$$\alpha_1 \leq \frac{1}{R_1 + R_2} \left( R_2 \left( v_1 - v_{\text{ш}} \frac{r_{\text{ш}}}{R_2} \right) + \delta\gamma \right), \quad (20)$$

$$\alpha_2 \leq \frac{1}{R_1 + R_2} \left( R_1 \left( v_1 - v_{\text{ш}} \frac{r_{\text{ш}}}{R_2} \right) - \delta\gamma \right). \quad (21)$$

Таким образом, получены условия для оценки углов контакта рассматриваемого двухвалкового модуля.

Из этих условий следует, что углы контакта  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  можно определить следующими выражениями:

$$\alpha_1 = \frac{1}{R_1 + R_2} \left( R_2 \left( v_1 - v_{\text{ш}} \frac{r_{\text{ш}}}{R_2} \right) + \delta\gamma \right), \quad (22)$$

$$\alpha_2 = \frac{1}{R_1 + R_2} \left( R_1 \left( v_1 - v_{\text{ш}} \frac{r_{\text{ш}}}{R_2} \right) - \delta\gamma \right). \quad (23)$$

В большинстве случаев в двухвалковых модулях валки устанавливаются в подшипниках качения, где величина трения невелика. Вследствие этого силой трения  $T_2$  можно пренебречь по сравнению с другими силами, действующими на валок [3].

Тогда условие захвата (18) принимает вид:

$$\alpha_1 + \alpha_2 \leq v_1. \quad (24)$$

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 требуется никаких дополнительных внешних заталкивающих сил [6].

Пусть линия, являющаяся продолжением переднего конца слоя материала, пройдет через ось вращения свободного валка. При этом угол наклона слоя материала относительно линии центров равняется критической  $\gamma_{\text{кр}}$ . Тогда имеем  $\gamma_{\text{кр}} = \alpha_2$ .

С учетом условий  $\gamma_{\text{кр}} = \alpha_2$  из неравенств (21) находим критический угол контакта:

$$\gamma_{\text{кр}} = \frac{R_1}{\delta + R_1 + R_2} v_1. \quad (25)$$

Из выражения (25) следует, что критический угол контакта увеличивается линейно с увеличением угла трения нижнего приводного валка.

При наличии трения в шейках свободного валка или при произвольном наклоне слоя материала относительно линии центров условия вращения слоем свободного

верхнего валка не будет выполняться, и поэтому для осуществления захвата обязательно требуется внешняя заталкивающая сила.

## ВЫВОДЫ

1. Получены условия для оценки углов контакта для асимметричного двухвалкового модуля, в котором реализуются одновременно геометрические, кинематические и трибологические несимметричности.

2. Выявлено, что условия захвата в двухвалковом модуле определяются радиусами валков, расстоянием между валками и коэффициентами трения валков по слою материала. Они не зависят от наклона подачи слоя материала к линии центров и от наклона валков относительно вертикали.

2. Результаты расчетов полученных зависимостей показали, что

- с возрастанием радиуса верхнего валка и угла наклона слоя материала относительно линии центров угол контакта нижнего валка увеличивается, а угол контакта верхнего валка уменьшается;

- с увеличением радиуса нижнего валка угол контакта нижнего валка уменьшается, а угол контакта верхнего валка увеличивается;

- сумма углов контакта не зависит от наклона подачи слоя материала к линии центров и от наклона верхнего валка относительно вертикали.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Грудев А.П. Захватывающая способность прокатных валков. – М.: Metallurgiya, 1998.

2. Кузнецов Г.К. Теоретический анализ условий втягивания парой валков с эластичными покрытиями. // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 1966, №1. С.144...146.

3. Кузнецов Г.К. Об условиях захвата слоя при свободном верхнем валке отжимной пары // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 1964, №2. С. 40...43.

4. Хуррамов Ш.Р. Анализ условий втягивания материала парой валков // Науч. техн. журнал Ферганского ПИ. – 2003, №2. С. 45...48.

5. Хуррамов Ш.Р., Абдукаримов А. Обобщенная модель двухвалковых модулей // Известия Киргизской ГТУ.– 2016, №1. С 109...112.

6. Неведов А.А., Калюжный И.Ф., Байдузж В.В. Особенности захвата и установившегося процесса при прокатке на станах с одним приводным валком. // Теория прокатки: Мат. Всесоюз. научн.-техн. конф.: Теоретические проблемы прокатного производства. – М.: Metallurgiya, 1975. С. 213...216.

## REFERENCES

1. Grudev A.P. Zakhvatyvayushchaya sposobnost' prokatnykh valkov. – M.: Metallurgiya, 1998.

2. Kuznetsov G.K. Teoreticheskiy analiz usloviy vtyagivaniya paroy valkov s elastichnymi pokrytiyami. // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. – 1966, №1. S.144...146.

3. Kuznetsov G.K. Ob usloviyakh zakhvata sloya pri svobodnom verkhnem valke otzhimnoy pary // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. – 1964, №2. S. 40...43.

4. Khurramov Sh.R. Analiz usloviy vtyagivaniya materiala paroy valkov // Nauch. tekhn. zhurnal Ferganskogo PI. – 2003, №2. S. 45...48.

5. Khurramov Sh.R., Abduraimov A. Obobshchennaya model' dvukhvalkovykh moduley // Izvestiya Kirgizskoy GTU.– 2016, №1. S 109...112.

6. Nefedov A.A., Kalyuzhnyy I.F., Bayduzh V.V. Osobennosti zakhvata i ustanovivshegosya protsessa pri prokatke na stanakh s odnim privodnym valkom. // Teoriya prokatki: Mat. Vsesoyuzn. nauchn.-tekhn. konf.: Teoreticheskie problemy prokatnogo proizvodstva. – M.: Metallurgiya, 1975. S. 213...216.

Рекомендована семинаром лаборатории "Теория механизмов и машин" ИМСС им. М.Т. Уразбаева АН Республики Узбекистан. Поступила 18.06.21.