

УДК 621.771

И.К. Огинский

**НАЗВАНИЕ ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ  
ПРИ ПРОКАТКЕ ДВУТАВРОВЫХ ПРОФИЛЕЙ  
В ЧЕТЫРЕХВАЛКОВОМ КАЛИБРЕ**

*Анотація. Виконано аналіз деформаційних особливостей при прокатці двотаврових балок у чотирьохвалковому калібрі, отримано аналітичні залежності для визначення меж осередку деформації і площ контакту металу з валком; у постановці та вирішенні задачі враховано, що формозмінення фланця може починатися поза межами геометричного осередку деформації спочатку у формі внеконтактного вигину з подальшим переходом до стану обтисків. Деформація позаконтактного вигину є регулюючим фактором при розподілі обтиснень між валками. З використанням отриманих залежностей виконано аналіз сил, що виникають на вертикальних і горизонтальних валках при прокатці двотаврових балок в універсальних калібрах на станах 550 і 600.*

*Ключові слова: прокатка, двотаврова балка, контактна площа, обтиск, осередок деформації.*

Двутавровые балки малых и средних размеров производят с уклоном внутренних граней полок или с параллельными полками; первые, как правило, производят с использованием закрытых балочных калибров в черновых клетях, в предчистовых и чистовых проходах применяют универсальные клетки. При всех неоспоримых технологических преимуществах четырехвалковых (универсальных) калибров перед закрытыми, их применение всегда сопряжено с трудностями в части эксплуатации универсальных клеток. Характер распределения металла по сечению двутавровой балки (полка по толщине в 1,5...2,5 раза больше чем стенка) предусматривает соответствующие режимы обжатий, следствием которых являются различные нагрузки на вертикальные и горизонтальные валки – нагрузки на вертикальными валки всегда выше. Еще более заметной разница становится при прокатке широкополочных и колонных балок [1, 2]. Все это при том, что по своим конструктивным особенностям подшипниковые узлы вертикальных валков обладают меньшей грузоподъемностью чем горизонтальные. (Под

---

© Огинский И.К., 2010

грузоподъемностью понимается максимальное усилие, воспринимаемое подшипниковым узлом). В мировой практике постоянно ведутся поиски новых технических решений в части технологии и оборудования, позволяющие повысить эксплуатационную надежность универсальных клетей, о таких исследованиях говорится, например, в работе [3].

Целью настоящей работы является анализ деформационных особенностей при прокатке двутавровых балок в четырехвалковом калибре, выявление возможностей рационального распределения обжатий между горизонтальными и вертикальными валками, разработка предложений, направленных на уменьшение нагрузок на валки.

Для оценки сил, действующих на горизонтальные и вертикальные валки, необходимо знание контактных площадей и протяженности их границ. Их определение в случаях прокатки балок с уклоном внутренних граней полок и с параллельными полками имеет свои особенности. При прокатке балок с параллельными полками уклоны образующих конических поверхностей вертикальных валков и сопрягаемых конических участков горизонтальных равны. Названная особенность является характерной для прокатки в реверсивной универсальной клетки, в указанном случае границы очага деформации и площади контактной поверхности металла с валком будут иметь вид, близкий к показанному на рис. 1 а.

Для подобных случаев границы очага деформации и контактные площади могут быть определены на основе метода, изложенного в работе [4]. Названный метод неприменим для прокатки балок с уклоном, поскольку вертикальные валки выполнены цилиндрическими, а угол наклона образующих конических участков (боковых) горизонтальных валков может изменяться в достаточно широких пределах. В чистовой клетки он не должен превышать требований стандартов (как правило, не более 12 %), в предшествующих калибрах стремятся к увеличению уклона с тем чтобы увеличить съём металла при переточках. В связи с этим обжатие фланцев по высоте может быть весьма неравномерным, соответственно, другим становится и характер контактных площадей металла с валком – размеры и протяженность границ, их форма, как

это показано на рис. 1 б-г. Как правило, прокатку ведут с постепенным уменьшением уклона внутренних граней полок, в этом случае контактная площадь будет иметь вид, аналогичный показанному на рис. 1 б, в пределе она стремится к виду на рис. 1 в, в частных случаях не исключена и обратная картина – рис. 1 г.

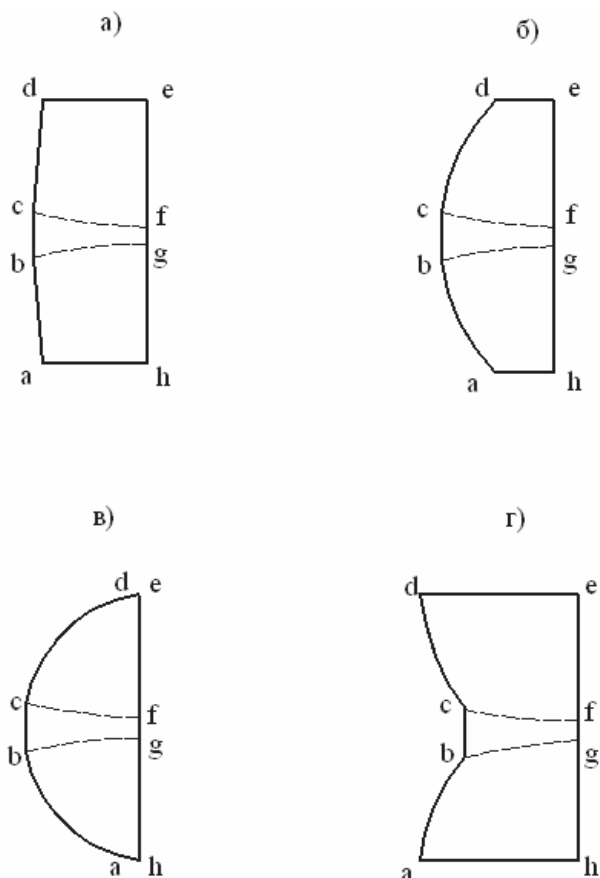


Рисунок 1 - Границы контактной поверхности по полкам при прокатке в универсальном балочном калибре

На рис. 2а изображен калибр рассматриваемого типа, с ним совмещен задаваемый раскат. Распределение обжатий между вертикальным валком  $\Delta tB$  и боковой поверхностью горизонтального  $\Delta tГ$  (рис. 2б) представляет собой достаточно сложную и неоднозначную картину, меняющуюся в зависимости от положения по высоте секущей плоскости N-N. Названная картина зависит от формы раската, профиля горизонтального вала и диаметра вертикального, в результате совместных действий названных факторов происходит перераспределение обжатий фланцев между вертикальным валком и боковой поверхностью горизонтального.

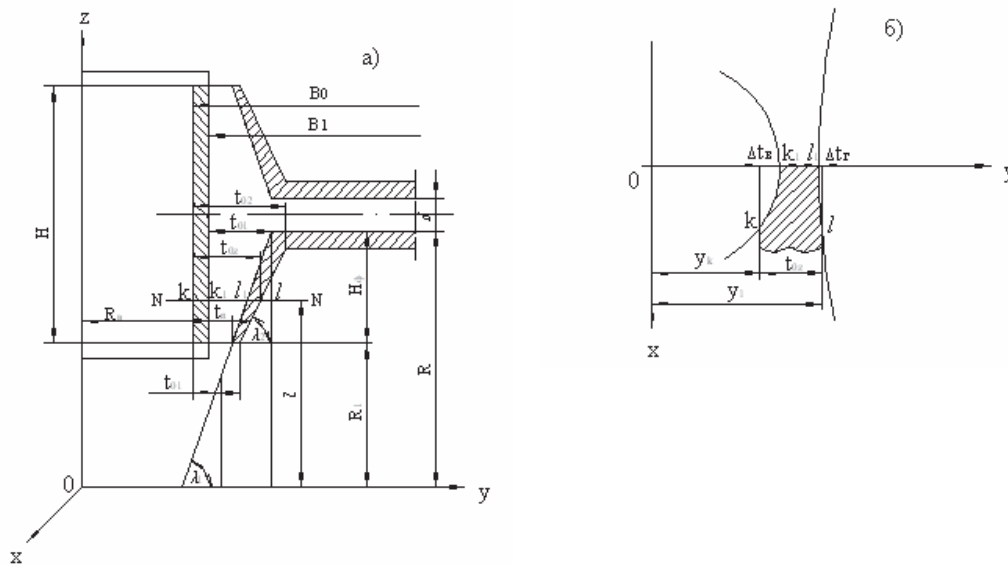


Рисунок 2 - Схема четырехвалкового балочного калибра

Формоизменение фланца начинается вне границ геометрического очага деформации первоначально в форме внеконтактного изгиба (рис. 3) с последующим переходом к состоянию обжатий, раскат при этом стремится занять положение наименьшей свободы. Деформация внеконтактного изгиба становится регулирующим фактором при распределении обжатий между валками.

В частном случае деформация внеконтактного изгиба может отсутствовать, это происходит когда упомянутые уклоны раската и валка равны, а ширина первого такова, что отсутствует стремление фланцев к поперечному перемещению. На рис. 3 а показано исходное состояние раската по отношению к калибру. Это наиболее распространенный на практике случай – уклоны внутренних граней полка и образующей конической поверхности горизонтального валка отличаются, причем уклон входящего раската больше. Так происходит при прокатке в смежных универсальных клетях, где профили горизонтальных валков практически всегда отличаются. При пластическом изгибе происходит изменение формы раската без изменения площади поперечного сечения и размеров в плоскостях горизонтальных сечений  $N - N$ , т.е.  $kl = k'l'$ ;  $mn = m'n'$ . Границей контактной поверхности на вертикальном валке является пространственная линия, лежащая на цилиндрической поверхности (рис. 4), границей соответствующей контактной площади на

горизонтальном валке также будет пространственная линия, но лежащая на конической поверхности (рис. 5).

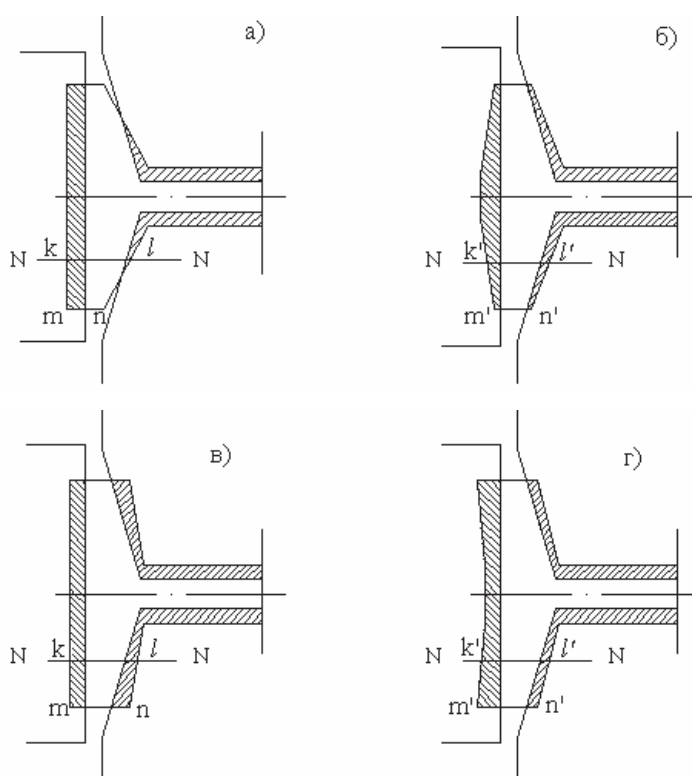


Рисунок 3 - Схемы распределения обжатий фланцев между горизонтальным и вертикальным валками

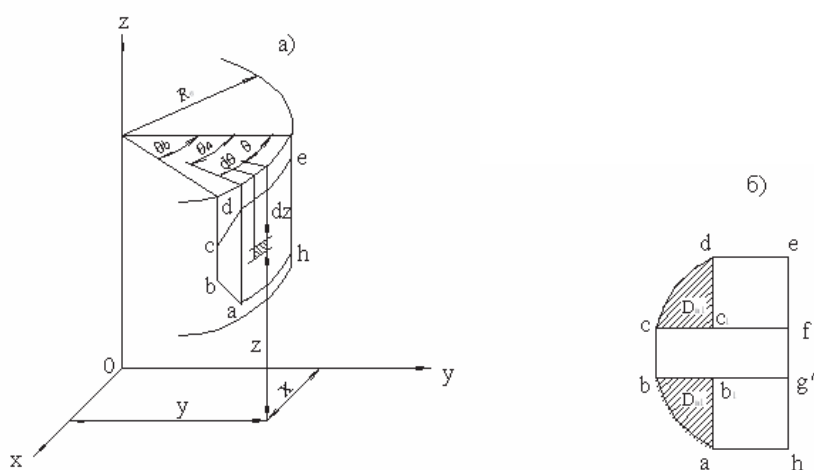


Рисунок 4 - К определению площади контакта полки с вертикальным валком

Площадь контакта фланца с горизонтальным валком найдем интегрированием по области, ограниченной упомянутой

пространственной линией, которая в свою очередь определяется совместным решением уравнений поверхностей горизонтального валка, вертикального и раската.

Уравнения линий пересечения плоскости  $N-N$  (рис. 2.а) с поверхностями валков будут иметь вид:

- с поверхностью горизонтального валка:

$$X^2 + Z^2 - \left[ (Y_T - R_B - t_{II}) \operatorname{tg} \lambda_1 + R_1 \right]^2 = 0. \quad (1)$$

- с поверхностью вертикального валка:

$$X^2 + Y_b^2 - R_B^2 = 0. \quad (2)$$

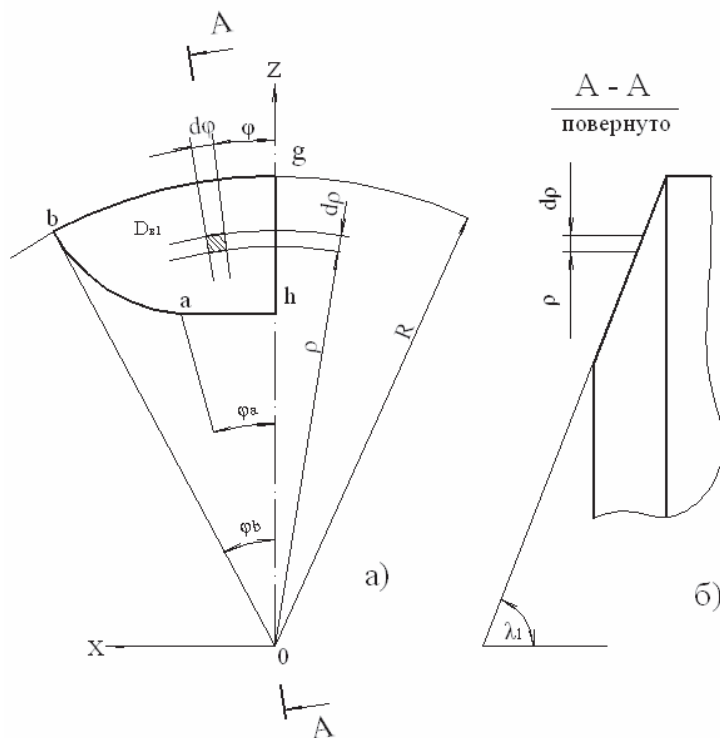


Рисунок 5 - К определению площади контакта фланцев с горизонтальным валком

Уравнение поперечного сечения наклонного участка раската (рис. 2 а) можно представить в виде:

$$t_{oz} = t_{oi} + \frac{Z - R_1}{\operatorname{tg} \lambda_2}. \quad (3)$$

Разность координат точек  $K$  и  $l$  составляет расстояние между ними. Решив уравнения (1) и (2) относительно  $Y$  и приравняв их разность выражению (3), находим:

$$\frac{\sqrt{X^2 + Z^2} - R_1}{tg\lambda_1} + R_B + t_{II} - \sqrt{R_B^2 - X^2} = \frac{Z - R_1}{tg\lambda_2}. \quad (4)$$

Полученное выражение, являющееся уравнением четвертой степени, можно упростить перейдя к цилиндрическим координатам.

При

$$X = \rho \cdot \sin \varphi; \quad Y = Y; \quad Z = \rho \cdot \cos \varphi \quad (5)$$

выражение (4) примет вид:

$$\rho - R_1 + tg\lambda_1 \left( R_B + t_{II} - \sqrt{R_B^2 - \rho^2 \cdot \sin^2 \varphi} - t_{OI} - \frac{\rho \cdot \cos \varphi - R_1}{tg\lambda_2} \right) = 0. \quad (6)$$

Введя обозначения:

$$\frac{tg\lambda_1}{tg\lambda_2} = n; \quad (7)$$

$$tg\lambda_1 \cdot (R_B - t_{OI} + t_{II}) + R_1 \cdot (n - 1) = D_1; \quad (8)$$

после преобразований получим:

$$\rho^2 \left[ (1 - n \cdot \cos \varphi)^2 + tg\lambda_1 \cdot \sin^2 \varphi \right] + 2 \cdot \rho \cdot (1 - n \cdot \cos \varphi) \cdot D_1 + D_1^2 - tg\lambda_1 \cdot R_B^2 = 0 \quad (9)$$

Выражения (4) и (9) представляют собой геометрическое место точек, определяющих границу участка входной части геометрического очага деформации (линия  $ab$  на рис. 1). Верхней границей контактной площади нижнего фланца с горизонтальным валком является линия  $bg$ , представляющая собой дугу окружности радиусом  $R$  (рис. 5 а). Выходной границей очага деформации является плоскость, проекция ее на  $XOZ$  представлена прямой  $gh$ .

Площадь контакта конического участка горизонтального валка с фланцем находим интегрированием по области  $D_r$  (рис. 5 а):

$$F_{r\varphi} = \frac{1}{\sin \lambda_1} \iint_{D_r} \rho d\varphi d\rho = \frac{1}{\sin \lambda_1} \left[ \int_{\varphi_a}^{\varphi_b} d\varphi \int_{\rho_1=f(\varphi)}^R \rho d\rho + \int_0^{\varphi_a} d\varphi \int_{\rho_2=\frac{R_1}{\cos \varphi}}^R \rho d\rho \right]. \quad (10)$$

Величины  $\varphi_a$  и  $\varphi_b$  определяются из уравнения (9). Учитывая, что в точке  $a$

$$\rho = \frac{R_1}{\cos \varphi} \quad (11)$$

после преобразований получим

$$\varphi_a = \arctg \frac{1}{R_1} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot R_1 \cdot D_1 \cdot (n-1) - R_1^2 \cdot (n-1)^2 - D_1^2 + tg^2 \lambda_1 \cdot R_B^2}{tg^2 \lambda_1 + 1}}. \quad (12)$$

Аналогично определяется координата точки  $b$ , в которой  $\rho = R$

$$\varphi_b = \arccos \frac{\sqrt{(R + D_1)^2 \cdot t^2 \cdot \lambda_2 + (tg^2 \lambda_2 - 1) \cdot (R^2 - R_B) - R - D_1}}{n \cdot R \cdot (tg^2 \lambda_2 - 1)}. \quad (13)$$

Интегрируя выражение (10), получим:

$$F_{\Gamma\Phi} = \frac{1}{2 \cdot \sin \lambda_1} \cdot \left[ R^2 \cdot \varphi_B - R_1^2 \cdot tg \varphi_a - \int_{\varphi_a}^{\varphi_b} f^2(\varphi) d\varphi \right]. \quad (14)$$

Уравнение (14) решается численными методами. Для определения площади контактной поверхности вертикального валка воспользуемся схемой, приведенной на рис. 4, из которой следует:

$$F_B = (Z_c - Z_b) \cdot R_B \cdot \theta_b + 2 \cdot (Z_b - Z_a) \cdot R_B \cdot \theta_a + 2 \cdot F_{BI}, \quad (15)$$

где

$$\begin{aligned} F_{BI} &= R_B \cdot \iint_{DBI} d\theta \cdot dZ = R_B \cdot \int_{\theta_a}^{\theta_b} d\theta \cdot \int_{Z=f(\theta)}^{Z_b} dZ = \\ &= R_B \cdot \int_{\theta_a}^{\theta_b} (Z_b - f(\theta)) \cdot d\theta = R_B Z_b \cdot (\theta_b - \theta_a) - R_B \cdot \int_{\theta_a}^{\theta_b} f(\theta) d\theta. \end{aligned} \quad (16)$$

Величины  $Z_a$  и  $Z_b$  можно определить, используя найденные ранее значения  $\varphi_a$  и  $\varphi_b$ :

$$Z_a = R_1 \cdot \cos \varphi_a; \quad (17)$$

$$Z_b = R \cdot \cos \varphi_b. \quad (18)$$

Для определения подынтегральной функции в выражении (16) перейдем к новым цилиндрическим координатам:

$$X = R_B \cdot \sin \theta; \quad Y = R_B \cdot \cos \theta; \quad Z = Z. \quad (19)$$

Приравнивая соответствующим образом выражения (18) и (5), находим:

$$\theta_a = \arcsin \frac{R_1}{R_B} \cdot tg \varphi_a; \quad (20)$$

$$\theta_b = \arcsin \frac{R}{R_B} \cdot \sin \varphi_b. \quad (21)$$

В новых координатах выражение (4) примет вид:



$$\sqrt{R_B^2 \cdot \sin^2 \theta + Z^2} - R_1 + \operatorname{tg} \lambda_1 \cdot (R_B + t_{II}) - \operatorname{tg} \lambda_1 \cdot R_B \cdot \cos \theta - \\ - \operatorname{tg} \lambda_1 \cdot t_{OI} - Z_h + R_1 \cdot n = 0. \quad (22)$$

Используя обозначения (7) и (8), после преобразований получим:

$$Z^2 \cdot (n^2 - 1) - 2 \cdot Z \cdot n \cdot (D_1 - \operatorname{tg} \lambda_1 \cdot R_B \cdot \cos \theta) - (\operatorname{tg} \lambda_1 + 1) \cdot R_B^2 \cdot \sin^2 \theta - \\ - 2 \cdot D_1 \cdot R_B \cdot \operatorname{tg} \lambda_1 \cdot \cos \theta + R_B^2 \cdot \operatorname{tg}^2 \lambda_1 + D_1^2 = 0. \quad (23)$$

После подстановки полученного выражения в уравнение (16), интегрирования и преобразований получим:

$$F_{BI} = R_B \cdot (\theta_B - \theta_a) \cdot \left[ \frac{(2 \cdot n - 1) \cdot (D_1 - R_B \cdot \operatorname{tg} \lambda_1)}{2 \cdot (n^2 - 1)} - \right. \\ \left. - \frac{\sqrt{(D_1 - R_B \cdot \operatorname{tg} \lambda_1)^2 - (n^2 - 1) \cdot (\operatorname{tg}^2 \lambda_1 - 1) \cdot R_B^2 \cdot \theta_b}}{2 \cdot (n^2 - 1)} - Z_b \right]. \quad (24)$$

Полученные зависимости позволяют выполнить анализ усилий, возникающих на вертикальных и горизонтальных валках при прокатке двутавровых балок в универсальных калибрах. Для создания сравнительной силовой картины нагрузок подшипниковых узлов достаточным является сравнение площадей контакта, определенному по вышеприведенному методу. Анализ выполнен применительно к условиям прокатки двутавровой балки № 10 по ГОСТ 8239-89 и колонной балки 120 по DIN 1025, первая производится на стане 550 Чусовского металлургического завода [5], вторая – на стане 600 Алчевского металлургического комбината [1]. На станах используются универсальные клетки, образованные кассетами с неприводными вертикальными валками. Подшипниковые валковые узлы названных устройств выполнены по достаточно традиционному для универсальных клеток принципу. Анализ показал необходимость снижения нагрузок на вертикальные валки в одном и другом случае или увеличения грузоподъемности подшипниковых узлов. Традиционным в таких случаях является второй путь, но это всегда требует увеличения габаритов оборудования (причем, во всех трех направлениях), для стана 600 это становится непреодолимым ограничением, поскольку использованы все резервы, для стана 550 ограничения носят менее выраженный характер. Схема установки неприводных вертикальных валков в рабочей клетки стана 550

показана на рис. 6 [5], из которого видно, что в поперечном направлении (вдоль осей вращения горизонтальных валков) длина бочки горизонтальных валков позволяет разместить вертикальные валки значительно большего диаметра. Одновременно это вызывает необходимость увеличения высоты кассеты, что нежелательно, поскольку вызывает ослабление тела валка и создает опасность их поломок. Кроме всего, что увеличение диаметра вертикальных валков вызывает рост контактных площадей и соответствующее увеличение нагрузок. Следует также принять во внимание важный деформационный факт, в соответствии с которым всякое увеличение длины площади контакта по полкам приводит к тому, что в большей степени раскрывается зона, где происходит обжатие полки только со стороны вертикального валка. Такой зоной является участок контактной поверхности, ограниченный линиями *cf* и *gb* (рис. 1).

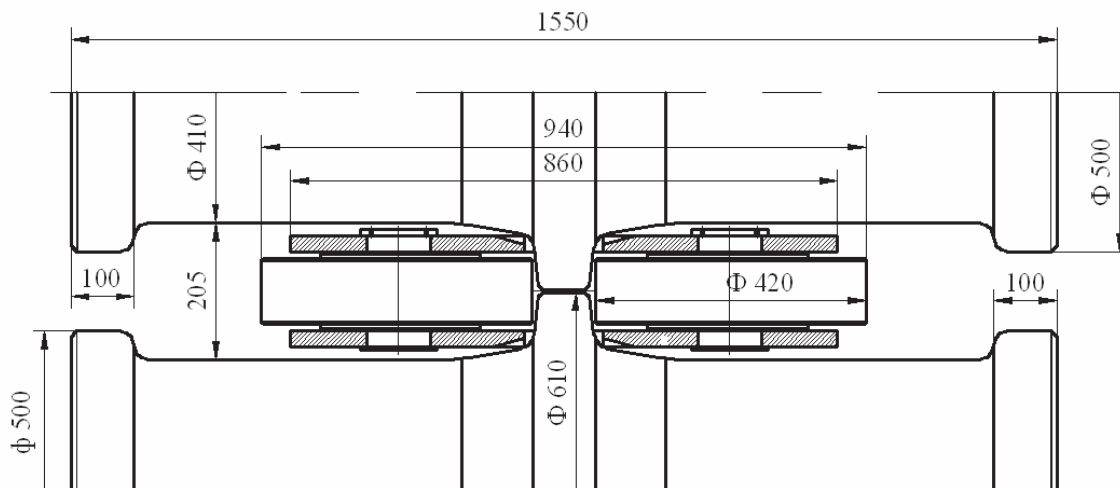


Рисунок 6. Схема установки узла вертикальных валков в чистой клетке стана 550

Анализ деформационной картины свидетельствует о том, что стенка профиля не в состоянии этому активно воспрепятствовать, поскольку длина дуги контакта по стенке значительно короче линий *cf* и *gb*. Происходит перераспределение металла, в результате которого возникает вдавливание металла вертикальным валком в щель между линиями *cf* и *gb*. Такое перераспределение является нерациональным, поскольку конические и переходные участки горизонтального валка, принимая к обжатию дополнительный объем металла, переходят к более стесненным условиям обжатия, что в

свою очередь приводит к интенсивному износу названных участков. Сказанное является еще одним подтверждением необходимости уменьшения диаметра вертикальных валков, приводя их к оптимальному соотношению:  $DВ/DГ = 0,25...0,4$ . При всей целесообразности названного уменьшения с позиций снижения нагрузок и улучшения деформационной ситуации препятствием становятся прочностные условия узлов вертикальных валков. Эффективным решением, позволяющим выйти на необходимый уровень прочностных характеристик, является уменьшение диаметра вертикальных валков с одновременной установкой их на опорные валки. Сведения о каком-либо широком использовании подобной схемы отсутствуют, известны лишь попытки применить названное решение фирмой «Син ниппон сэйтэцу» (Япония), об этом говорится в работе [3]. Трудности, которые возникают при реализации подобной схемы, проявляются в организации регулировок и операциях сборки-разборки. Подобные трудности не возникают если узел вертикальных валков выполнен по принципу кассеты, этому способствуют ее конструктивные особенности [6]. Для клеток стана 600 разработана конструкция узла вертикальных валков с установкой каждого на два опорных валка, диаметр рабочих валков составляет 250 мм, диаметр опорных – 400 мм. Принцип перевалки клеток в целом сохранился, для регулировки вертикального межвалкового зазора разработано рычажно-эксцентриковое нажимное устройство. Подобный принцип может быть применен для чистой клетки стана 550.

#### **Выводы**

Выполнен анализ деформационных особенностей при прокатке двутавровых балок в четырехвалковом калибре, получены аналитические зависимости для определения границ очага деформации и площадей контакта металла с валком; в постановке и решении задачи учтено, что формоизменение фланца может начинаться вне границ геометрического очага деформации первоначально в форме внеконтактного изгиба с последующим переходом к состоянию обжатий. Деформация внеконтактного изгиба является регулирующим фактором при распределении обжатий между валками. С использованием полученных зависимостей выполнен анализ усилий, возникающих на вертикальных и горизонтальных валках при прокатке двутавровых балок в

универсальных калибрах на станах 550 и 600. Отмечена деформационная особенность, связанная с длиной площади контакта по полкам. Увеличение названной длины приводит к тому, что раскрывается зона, где происходит обжатие полки только со стороны вертикального валка. Сопутствующим явлением становится перераспределение обжатий по площади полки, что выражается во вдавливании металла вертикальным валком в щель между цилиндрическими поверхностями горизонтальных валков. Такое перераспределение является нерациональным, поскольку приводит к интенсивному износу названных участков. На основе анализа силовой и деформационной картины установлено, что оптимальным соотношением вертикальных и горизонтальных валков является  $DB/DГ = 0,25...0,4$ . Эффективным решением, позволяющим выйти на необходимый уровень прочностных характеристик и деформационных параметров является уменьшение диаметра вертикальных валков с одновременной установкой их на опорные валки.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Разработка и освоение технологии производства колонной двутавровой балки 120 DIN/ М.Б. Луцкий, И.К. Дорожко, А.А. Чичкан, В.А. Луценко // Сучасні проблеми металургії. Наукові вісті. – 2005. – Т.8, Пластична деформація металів. – С. 333-336.
2. Разработка и освоение технологии производства двутавров с параллельными гранями полок/ М.Б. Луцкий, И.К. Дорожко, А.А. Чичкан, В.А. Луценко // Сталь. –2001. – № 2. – С.31-33.
3. Илюкович Б.М. Прокатка и калибровка. Справочник: в 6т. / Б. Илюкович. – Днепропетровск:РВА Дніпро-Вал,-2004. – Том 6. – 823 с.
4. Теряев В.А. О площадях контакта металла с валком при прокатке балок в обычных и универсальных калибрах/ В.А. Теряев, Ю.В. Павлович // Прокатное производство. Сб. научн. тр. института черной металлургии. – 1969. – Вып. 29. – С. 146-154.
5. Освоение технологии прокатки двутавровой балки с применением четырехвалкового калибра/ И.К. Огинский, А.П. Грудев, С.Е. Меркурьев [и др.] // Сталь. – 1989. – № 7. – С. 57-59.
6. Огинский И. К. Особенности процесса прокатки простых и фасонных профилей в четырехвалковом калибре, образованном кассетой / И.К. Огинский // Сб. научн. тр. конф. "Деформация металла в многовалковых калибрах". – Магнитогорск. – 1987. – С. 57-59.

Получено 07.10.2010г.