

(GB) – 15 с.: ил. 3. Патент 4959099 США, МКИ В21Н7/00. Taper rolling of metal / A.Wilson – 9 с.: ил. 4. Патент 78827 ФРГ, МКИ В21Н7/00. Walzwerk zum walzen von dünnem scharf und fein profilirtem walzgute / L.Mannstaedt (BRD) – 6 с.: ил. 5. Патент 4290288 США, МКИ В21В37/14. Device for narrowing the breadth of a sheet spring material in an apparatus for manufacturing a taper leaf spring / M.KAWAKUBO, Y.SAKAI, A.OHNO (Japan) – 8 с.: ил. 6. Патент 1017706 Великобритания, МКИ В21Н7/00. Improvements in the shaping of metal bars / (GB) – 6 с.: ил. 7. Патент 58209404 Япония, МКИ В21В13/02. Taper rolling device / I.Yamamoto; K.Kinoshita; M.Morita (Japan) – 5 с.: ил. 8. Патент 60231519 Япония, МКИ В21В37/24. Taper rolling device for leaf spring / S.Suzuki, T.Furuyama, M.Kawarubo (Japan) – 5 с.: ил. 9. Патент 4512169 США, МКИ В21В37/72. Automatic plate thickness control device / K.Miura (Japan) – 9 с.: ил. 10. Патент 55024758 Япония, МКИ В21В1/38. Taper rolling control unit / M.Uechi, K.Tanaka – 5 с.: ил. 11. Патент 57152303 Япония, МКИ В21В1/22. Rolling method for strip having differential thickness / R.Terakado – 4 с.: ил. 12. Патент 4266418 США, МКИ В21В37/24. Method for manufacturing a taper spring / Y.Sakai, J.Takahashi (Japan) – 8 с.: ил. 13. Патент 3417592 США, МКИ В21Н7/00. Taper-rolling of metals / R.Fielding – 5 с.: ил. 14. Патент 5001918 США, МКИ В21Д7/04. Method and apparatus for making blanks of a profile varying lengthwise / A.V.Stepanenko, V.A.Korol, G.A.Isaevich, A.P.Grechenko, S.S.Benedis, S.S.Poplavski; I.M.Shimanovich, V.L.Markhasin (USSR) – 19 с.: ил. 15. Патент 6012320 США, МКИ В21Д7/02. Leaf spring straightening apparatus / A.V.Stepanenko, V.A.Korol, A.P.Grechenko (Belarus) – 6 с.: ил. 16. Патент 6173599 США, МКИ В21Д7/02. Leaf spring straightening apparatus / A.V.Stepanenko (Belarus), V.A.Korol (Belarus), A.P.Grechenko (Belarus) I.E.Dzieciol (CA), J.C.Waugh (CA), J.J.Murtach (CA) – 10 с.: ил. 17. Патент 974990 Великобритания, МКИ В21Н7/00. Taper roll machine and method / (GB) – 13 с.: ил. 18. Патент 582094044 Япония, МКИ В21В1/38. Taper rolling device / I.Yamamoto, K. Kinoshita, M. Morita (Japan) – 5 с.: ил. 19. Патент 3199327 США, МКИ В21Н7/00. Machine for making single leaf springs and the like / F.R.KRAUSE (США) – 6 с.: ил. 20. Патент 3824829 США, МКИ В21В13/09. Roll mill with shifting cams for shaping bars / J.Miller (США) – 5 с.: ил. 21. Патент 400899 Великобритания, МКИ В21В38/10. Improvements in or relating to means for adjusting or indicating the magnitude of the gap between the rolls in rolling mills / – 7 с.: ил. 22. Патент 1273476 ФРГ, МКИ В21Н7/00. Taper roll machine and method / R.H.Groves, R.R.Greene, J.D.Boadk / (ФРГ) – 5 с.: ил. 23. Патент 3499305 США, МКИ В21Н7/00, В21Н7/00, (IPC1-7): В21В37/14, В21В31/30. Rolling mill and method of rolling strips / T.W.ABERNATHY (США) – 5 с.: ил. 24. А. С. 564068 СССР, МКИ В21НВ/00. Стан для прокатки профилей переменного сечения / О.Г.Кидимник, М.Л.Чеповидцкий, Н.И.Белицкий и др. (СССР). – 4 с.: ил

УДК 621.771

*Щукин В.Я., Исаевич Л.А., Кожевникова Г.В.*

## **СКОРОСТИ ТЕЧЕНИЯ МЕТАЛЛА И ДЕФОРМАЦИИ В ПЛАСТИЧЕСКОЙ ОБЛАСТИ ПРИ ПОПЕРЕЧНОЙ ПРОКАТКЕ**

*БНТУ, ГНУ «ФТИ НАН Беларуси»  
Минск, Республика Беларусь*

С применением численного метода построим кинематически и статистически корректное поле линий скольжения (ЛС) при поперечной прокатке (ПП). Определим скорости течения металла в очаге деформаций и проанализируем распределение деформаций в пластической области.

Рассмотрим особенности поля ЛС (рис. 1) при ПП. Жесткая область  $KNL'$  вращается с угловой скоростью  $\omega$  вокруг центра  $O_1$ , область  $LPK'$  – вокруг центра  $O_2$ .

Проекция расстояния  $O_1O_2$  на контакт равна параметру  $C$ . Направления ЛС  $\alpha$  и  $\beta$  при ПП принимаются аналогично [1].

Вдоль  $\alpha$ -ЛС  $KNK'$  реализуется разрыв скорости  $v_1$ , вдоль  $\beta$ -ЛС  $MNL'$  и  $LPM'$  – разрывы скорости  $v_2$ . Из условия симметрии разрывы скорости по линиям  $MNL'$  и  $LPM'$  равны. В точках  $M$  и  $M'$  разрывы скорости отражаются от контакта и согласно теории пластичности (условие непрерывности нормальной компоненты) вдоль  $\alpha$ -линий  $KM$  и  $K'M'$  должны возникнуть разрывы скорости  $v_3$ :

$$v_3 = -ctg\varphi v_2. \quad (1)$$

ЛС  $KOK'$  в точке  $O$  меняет знак кривизны. В итоге в соответствии с первой теоремой Генки все ЛС, пересекая  $\beta$ -линию  $SOS'$ , должны менять знак кривизны.

Рассмотрим скорости перемещения частиц металла в особой точке  $K$ . В жесткой области  $L'NK$  составляющие скорости равны (рис. 2, а):

$$V_{IX} = R\omega \cos\varphi_1; \quad V_{IZ} = R\omega \sin\varphi_1, \quad (2)$$

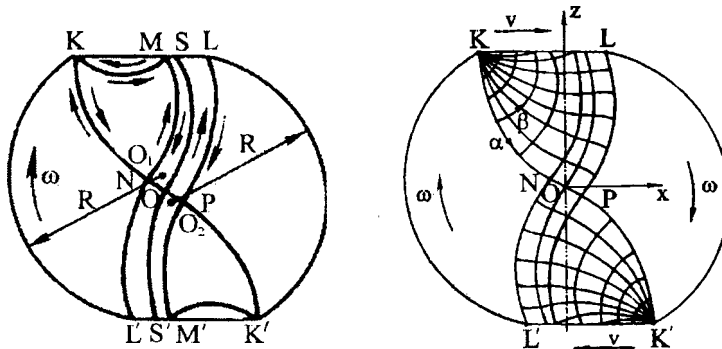


Рисунок 1 - Поле линий скольжения при ПП при степени обжатия 1,10

где  $R, \varphi_1$  – параметры поперечного сечения заготовки [208].

Составляющая вдоль оси  $OZ$  разрыва скорости  $v_1$  равна  $v_{1Z} = v_1 \sin\varphi$ , где  $\varphi$  – угол между  $\alpha$ -ЛС  $KO$  и осью  $OX$ . Составляющая вдоль оси  $OZ$  разрыва скорости  $v_3$  равна

$$V_{3Z} = v_3 \sin\varphi', \quad (3)$$

где  $\varphi'$  – угол наклона  $\alpha$ -линии  $KM$ . Условие непрерывности нормальной компоненты скорости в точке  $K$  запишется в виде

$$R\omega \sin\varphi_1 + v_1 \sin\varphi + v_3 \sin\varphi' = 0. \quad (4)$$

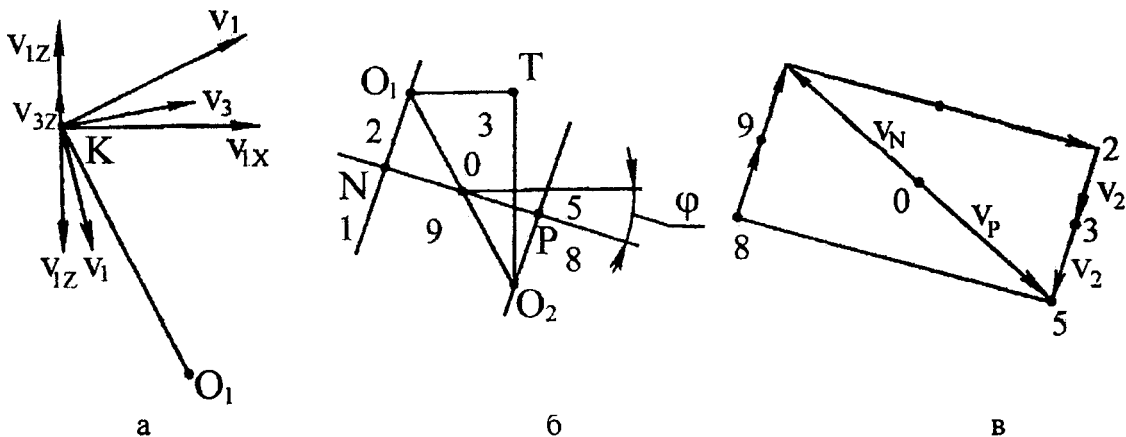


Рисунок 2 - Составляющие скорости в точке  $K$  (а) и годограф скоростей(в) в центральной области(б)

Из уравнения (4) может быть найден разрыв скорости

$$v_1 = (R\omega \sin\varphi_1 + v_3 \sin\varphi) / \sin(-\varphi). \quad (5)$$

Знак “-“ в знаменателе соотношения (5) означает, что угол  $\varphi$  отрицательный. В частном случае, когда  $v_2=v_3=0$ , определение  $v_1$  упрощается:

$$v_1 = R\omega \sin\varphi_1 / \cos(-\varphi). \quad (6)$$

Разрыв скорости  $v_2$  может быть найден из условия непрерывности нормальной компоненты скорости в точке L:

$$v_2 = R\omega \sin\varphi_2 / \cos\varphi, \quad (7)$$

где  $\varphi_2$  – параметр поперечного сечения образца [2].

Согласно [2] параметр  $\varphi_2$  не превышает  $10^\circ$  для степени обжатия  $\delta < 1,15$ . Причем влияние этого параметра на контактное давление  $P_{\mu}/(2K)$  не столь значительно. Для упрощения решения можно допустить, что  $\varphi_2=0$ . При этом разрыв скорости  $v_2$  также становится равным нулю, а поле будет содержать только один разрыв скорости по линии КОК’.

Рассмотрим годограф скоростей в осевой области образца (рис. 2, в). Скорость точки N равна

$$V_N = R_1\omega, \quad (8)$$

где  $R_1$  – расстояние  $O_1N$  (см. рис. 1).

Отложив вектор из полюса 0, получим отображение на годографе скоростей области 1 (рис. 2). Из точки 1 отложим вектор разрыва скорости  $\bar{v}_1$  и получим отображение скорости области 2. Отложив из точки 2 вектор  $\bar{v}_2$ , получим отображение скорости области 3. Вторично отложив вектор  $\bar{v}_2$ , получим отображение скорости области 5. Вектор 0-5 является скоростью точки P. Наглядно видно (рис. 2) выполнение условия симметрии

$$\bar{V}_{01} = \bar{V}_{02}. \quad (9)$$

Из рассмотренного годографа нетрудно определить

$$|2V_{01}|^2 = |V_1|^2 + |2V_2|^2. \quad (10)$$

Для случая  $\varphi_2=0$  получим

$$\omega R_1 = 0,5 v_1. \quad (11)$$

Из совместного решения (4) и (6) найдем

$$R \sin\varphi_1 = 2R_1 \sin\varphi. \quad (12)$$

Анализ уравнения (12) показывает, что для выполнения граничных условий по скоростям в осевой области необходимо соблюдать определенное соотношение между параметрами  $R$  и  $R_1$ . Из рассмотрения рис.2, б можно установить

$$O_2T = R (1 - \cos\varphi_1);$$

$$O_1T = C;$$

$$O_1O = 0,5 \sqrt{C^2 + R^2 (1 - \cos\varphi_1)^2};$$

$$\angle O_1O_2T = \text{arctg} [C / (R (1 - \cos\varphi_1))]; \quad (13)$$

Таким образом, угол наклона  $\alpha$ -ЛС в центральной области образца равен

$$\begin{aligned} \varphi_0 &= \angle NOQ + \angle O_1OT - 90^\circ = \\ &= \arcsin \left[ R \sin\varphi_1 / (\sin\varphi \sqrt{C^2 + R^2 (1 - \cos\varphi_1)^2}) \right] + \\ &+ \text{arctg} [C / (R(1 - \cos\varphi_1))] - 90^\circ. \end{aligned} \quad (14)$$

$$O_1N = R_1 = R \sin \varphi_1 / (2 \sin \varphi_K) ;$$

$$\angle NOO_1 = \arcsin [R \sin \varphi_1 / (\sin \varphi_K \sqrt{C^2 + R^2 (1 - \cos \varphi_1)^2})] .$$

Выражение (14) позволяет без построения поля ЛС определить в осевой области образца касательное напряжение  $\tau_{xz}$ , нормальные напряжения  $\sigma_z$  и  $\sigma_x$  с точностью до постоянного интегрирования. Также представляется возможным определить перепад гидростатического давления между точками О и К.

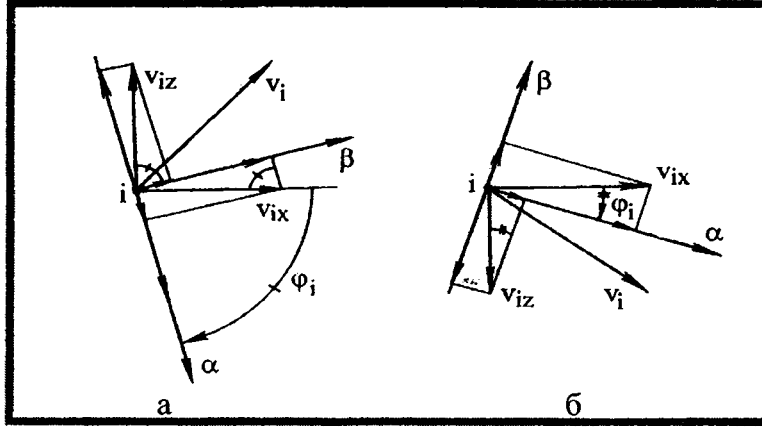


Рисунок 3 - Скорости на линии скольжения KNO (а) и скорости на линии скольжения PP'L (б)

Численное построение поля ЛС для случая  $\varphi_2=0$  производится следующим образом. Задаются параметры  $\varphi_1$  и  $\delta$ . По известным формулам [2] рассчитываются величины  $C, R, R_1, \varphi_0$ . Линия скольжения KNO задается в виде уравнения

$$Az^3 + Bz^2 + Cz + D = x . \quad (15)$$

Из четырех неизвестных  $A, B, C, D$ , входящих в уравнение (15), могут быть определены только три, так как известны координаты точек О и К линии KNO в точке О (формула (14)). Таким образом, представляется возможность варьирования одним неизвестным с тем, чтобы вдоль линии KNO и PP' наилучшим образом выполнялось условие уравнения Гейрингера

$$\begin{aligned} du_\alpha - u_\beta d\varphi &= 0 && \text{вдоль направления } \alpha\text{-линии;} \\ du_\beta - u_\alpha d\varphi &= 0 && \text{вдоль направления } \beta\text{-линии.} \end{aligned} \quad (16)$$

Рассмотрим соотношение скоростей (рис. 3, а) на линии скольжения KNO. Со стороны жесткой области скорость равна  $V_i$ , где  $V_{ix}$  и  $V_{iz}$  – ее составляющие. В пластической области к скорости течения металла добавляется разрыв скорости. Составляющие суммарной скорости вдоль линий  $\alpha$  и  $\beta$  определяются выражениями

$$\begin{aligned} u_\alpha &= v + V_{iz} \sin \varphi_i + V_{ix} \cos \varphi_i ; \\ u_\beta &= V_{iz} \cos \varphi_i - V_{ix} \sin \varphi_i . \end{aligned} \quad (17)$$

Опустив из точки  $O_1$  перпендикуляр на линию KNO, определяем координаты точек N и P. Кривая KN разбивается на ряд отрезков таким образом, чтобы от одного узла к другому угол  $\varphi$  изменялся на постоянную величину. Далее из точки К разворачивается веер ЛС. Координаты точек определяются численно [3]:

$$\begin{aligned} Z_{m,n} - Z_{m-1,n} &= \left\{ \operatorname{tg} \frac{1}{2} (\varphi_{m,n} + \varphi_{m-1,n}) \right\} (X_{m,n} - X_{m-1,n}) ; \\ Z_{m,n} - Z_{m,n-1} &= - \left\{ \operatorname{ctg} \frac{1}{2} (\varphi_{m,n} + \varphi_{m,n-1}) \right\} (X_{m,n} - X_{m,n-1}) . \end{aligned} \quad (18)$$

Верв разворачивается до тех пор, пока угол наклона  $\alpha$ -линии в точке К не станет больше  $-45^\circ$ , и вдоль направления  $\beta$ -линии PP' выполняется условие уравнения Гейрингера:

$$du_\beta + u_\alpha d\varphi = 0 \quad \text{вдоль направления } \beta\text{-линии} \quad (19)$$

В точке P' определяется угол наклона линии PP'. Уравнение линии P'L задается в виде

$$A_1 z^3 + B_1 z^2 + C_1 z + D_1 = x. \quad (20)$$

Из четырех неизвестных  $A_1, B_1, C_1, D_1$  можно определить три: координаты точек L, P' и угол наклона линии в точке P'. Четвертый неизвестный параметр уравнения варьируется для выполнения условия (19) вдоль линии P'L.

На рис. 3, б показаны скорости в точке i на линии PP'L. Нетрудно установить, что

$$\begin{aligned} u_\alpha &= V_{ix} \cos \varphi_i - V_{iz} \sin \varphi_i; \\ u_\beta &= -V_{ix} \sin \varphi_i - V_{iz} \cos \varphi_i. \end{aligned} \quad (21)$$

Окончательное построение поля ЛС заканчивается вычислением узлов сетки поля в области KP'L по формулам (18). Абсолютные значения напряжений в узлах сетки ЛС находят с использованием уравнений [2]. Скорости в узлах определяют по уравнениям (16) и (19).

Скорости деформации могут быть определены по полю скоростей с использованием известных [3] зависимостей:

$$\xi_x = \frac{\partial V_x}{\partial x}; \quad \xi_z = \frac{\partial V_z}{\partial z}; \quad \eta_{xz} = \frac{\partial V_x}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial x}; \quad (22)$$

$$H = \sqrt{\frac{3}{4} (\xi_x^2 + \xi_z^2 - \xi_x \xi_z) + \eta_{xz}^2},$$

где  $\xi_x, \xi_z, \eta_{xz}/2$  – компоненты тензора скоростей деформации;

H – интенсивность скоростей деформации сдвига.

В таблице приведены результаты проверки выполнения уравнения Гейрингера вдоль  $\alpha$ -линии скольжения KNO ( $\delta=1,10, \varphi_1=32^\circ, \varphi_2=8^\circ, D=400$  мм,  $\omega=1$  с<sup>-1</sup>). Линия описывается уравнением

$$x = 32,82 \cdot 10^{-4} z^2 - 1,228 z. \quad (23)$$

Таблица. Проверка выполнения условий уравнения Гейрингера вдоль  $\alpha$ -ЛС

x	z	$u_\alpha$	$u_\beta$	$du_\alpha$	$u_\beta d\varphi$	$\Delta$
-114,81	181,80	5,98	171,29	—	—	—
-113,76	168,40	20,70	165,82	14,72	14,71	0,01
-111,46	154,72	34,88	158,66	14,18	14,16	0,02
-107,79	140,54	48,34	149,54	13,46	13,45	0,01
-102,47	125,56	60,90	134,01	12,56	12,55	0,01
-95,13	109,49	72,34	123,67	11,44	11,42	0,02
-85,16	91,91	82,98	105,84	10,04	10,01	0,03
-71,65	72,30	90,68	83,60	8,30	8,27	0,03
-53,15	49,94	96,81	55,53	6,13	6,07	0,06
-27,37	23,80	100,14	19,34	3,33	3,27	0,06
$V_{cp} = 89,3$						$\Delta_{cp} = 0,028$

Примечание. Во всех случаях  $d\varphi = 0,0872$ .

Средняя погрешность составила  $\Delta_{cp} = 0,028$ , средняя скорость  $V_{cp} = 89,3$ . Погрешность выполнения условий уравнения Гейрингера вдоль  $\alpha$ -линии скольжения составляет

$$k = (\Delta_{cp} / V_{cp}) \cdot 100\% = 0,031\%. \quad (24)$$

Таким образом, численным методом построено кинематически и статистически корректное поле ЛС при ПП плитами. Решение получено с учетом выполнения условия Гейрингера и непрерывности нормальной компоненты скорости. Решение позволяет без построения всего поля

ЛС определять на оси  $O$  угол наклона  $\alpha$ -линии и компоненты с точностью до постоянной интегрирования. Определены скорости течения металла в очаге деформации при ГП.

Анализ накопленных деформаций и распределения напряжений в очаге деформации при ГП показывает, что в окрестности оси наблюдается неблагоприятная область: в ней действуют растягивающие напряжения и накапливаются (после конкретного значения циклов нагружения) критические деформации, приводящие к разрушению металла.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кожевникова Г.В. Развитие теории и технологии формообразования осесимметричных ступенчатых деталей поперечной прокаткой. – Мн.: Издательский дом «Белорусская наука», 2005. – 250 с.
2. Щукин В.Я. Основы поперечно-клиновой прокатки. – Мн.: Наука и техника, 1986. – 223 с.
3. Хилл Р. Математическая теория пластичности. – М.: ГИТТЛ, 1956. – 407 с.

УДК 621.833

*Кане М.М.*

## НАДЕЖНОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ И МЕТОДЫ ЕЁ ОЦЕНКИ

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Беларусь*

Начиная с 1969 г. в технических журналах и других публикациях кроме работ по надежности изделий стали появляться статьи и монографии, посвященные вопросам технологической надежности, надежности технологических систем, надежности технологических процессов и операций. Во всех этих работах ставится вопрос о применении общих методов теории надежности к исследованию основных закономерностей изменения параметров технологических систем в процессе изготовления продукции.

Впервые термин «технологическая надежность станков» был введен А. С. Прониковым [1]. Это понятие определено А. С. Прониковым как «способность станка сохранять качественные показатели технологического процесса (точность обработки и качество поверхности) в течение заданного времени». В работах [2, 3, 4] были рассмотрены некоторые количественные оценки технологической надежности токарно-револьверных автоматов, прецизионных токарных станков, бесцентровых внутришлифовальных, радиально-сверлильных и других видов станков. В этих работах исследуется в основном только способность сохранять точность обработки в течение определенного периода времени. Но, очевидно, что точностные характеристики обработанных деталей зависят не только от состояния станка, но и от многих других факторов (состояние инструмента, оснастки, характеристики материалов и т. д.). Поэтому логическим развитием понятия «технологическая надежность станка» явилось введение термина «технологическая надежность». И. В. Дунин-Барковский [3] определил это понятие как «свойство технологического оборудования и производственно-технических систем, таких, как станок — приспособление-инструмент — деталь (СПИД), система литейного, кузнечно-прессового или другого производственно-технического оборудования или автоматических линий, сохранять на заданном уровне выходные параметры качества производимого изделия в течение требуемого времени» [3]. Затем А.С. Проников ввел понятие «надежность технологических процессов». Он пишет, что «большой процент отказов различных машин связан с недостаточной надежностью технологического процесса», что «...технологический процесс должен быть надежным, т.е. не допускать таких показателей, которые могут влиять на качество выпускаемых изделий» [4]. Вопросы оценки надежности технологических процессов и безотказности рассматриваются также в работах П.И. Бобрика [5], А.Л. Меерова и др., причем только с точки зрения способности технологических систем, про-