

Žarkov, V.A., Teterin, G.P.

ALGORITHMMEN EINER FEHLERABGLEICHMETHODE FÜR DAS TIEFZIEHEN  
VON NAPFFÖRMIGEN WERKSTÜCKEN

Übersetzung aus:

Kuznečno-štampovočnoe proizvodstvo. Moskva, 1979,  
Nr 7, S. 30 - 33.

Russ.: **АЛГОРИТМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВЫТЯЖКИ  
КОРОБЧАТЫХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ЛИСТОВОГО МЕТАЛЛА**

Algoritmy avtomatizirovannogo proektirovanija  
vytjažki korobčatych detalej iz listovogo metalla

Auch beim Umformen werden immer häufiger Methoden eingesetzt, bei denen die technischen Vorgänge mit Rechnern geplant werden; dadurch lassen sich Lieferfristen, Arbeitsaufwand, Kosten verringern und die Planungsqualität verbessern. Die größte Wirkung erzielt man, wenn bei der rechnergestützten Planung moderne, wissenschaftlich begründete Rechenverfahren eingesetzt werden. Im vorliegenden Aufsatz werden vorgestellt: eine Methode, mit der sich die Geometrie der napfförmigen Teile kodieren läßt, und eine Methode zur Untersuchung des Werkstoffflusses während der Umformung. Beide Methoden werden zu einer einzigen zusammengefaßt. Sie besteht darin, daß Form und Abmessungen einer Platine und die Übergänge beim Tiefziehen von napfförmigen Werkstücken unterschiedlicher Gestalt aus Blechen rechnergestützt geplant werden.

Um die Planung des Tiefziehens unter Verwendung von Rechnern durchführen zu können, muß die Ausgangsinformation kodiert werden. Das erarbeitete Kodierverfahren für die Geometrie nichtachssymmetrischer<sup>1)</sup> napfförmiger Werkstücke berücksichtigt die Forderungen: Einfachheit und Eindeutigkeit der Kodierung, wie auch die spezifischen geometrischen Besonderheiten der zu fertigenden Teile.

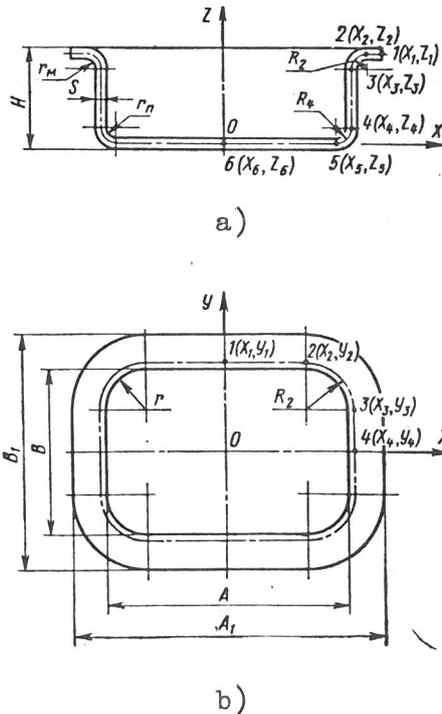


Abb. 1. Kodierung der Mantellinie (a) und des Wandverlaufs des Werkstücks im Grundriß (b).

Abb. 1 zeigt die Skizze eines typischen nichtachssymmetrischen napfförmigen Werkstücks, das durch Tiefziehen erstellt wurde. Zum Kodieren der Geometrie des Werkstücks werden die mittleren Mantellinien vom Querschnitt des Werkstücks durch die Ebene  $xoz$  (Abb. 1a) und des senkrechten Wandverlaufs im Grundriß in der Ebene  $xoy$  (Abb. 1b) in Abschnitte gerader Linien und einen Krümmungsbogen zerlegt (die komplizierten Bögen der Mantellinie am Einlauf und Napfboden werden

<sup>1)</sup> Hier und desweiteren ist wahrscheinlich "nichtrotationssymmetrisch" bzw. "unregelmäßig" gemeint (Anm. d. Übers.).

näherungsweise in besagte Einzelteile zerlegt), und auf den Ebenen  $xoz$  und  $xoy$  werden jeweils die Koordinaten  $k - x$  und  $l - x$  der Grenz- und Verbindungspunkte bestimmt. Die positive Umlaufrichtung der Mantellinie und des Wandverlaufs des Werkstücks im Grundriß ist so, daß der Innenhohlraum des Werkstücks immer auf der rechten Seite liegt.

Somit kann das geometrische Bild eines beliebigen napfförmigen Werkstücks in genügender Vollständigkeit hinsichtlich der Planung der Ziehtechnik durch ein mathematisches Modell im 3-dimensionalen Raum  $oxyz$  durch die Reihenfolge der beiden Folgen  $A_k$  und  $B_l$  dargestellt werden:

$$\begin{aligned} A_k &= \{x_k, z_k, R_k, m_k, n_k\}; \\ B_l &= \{x_l, y_l, R_l, m_l, n_l\}, \end{aligned} \quad (1)$$

mit  $x_k$  und  $x_l$  Abszissen  $k - x$  ( $k = 1, 2, \dots, N_1$ ) und  $l - x$  ( $l = 1, 2, \dots, N_2$ ) der Grenz- und Verbindungspunkte;  $R_k$  und  $R_l$  Radien des Krümmungsbogens, die bei positivem Umlauf um die Mantellinie oder den Wandverlauf jeweils über den  $k$ -ten oder  $l$ -ten Punkt hinausgehen;  $m_k$  und  $m_l$  Wölbungsmerkmale des Krümmungsbogens [7];  $n_k$  und  $n_l$  Lagemerkmale des Zentrums des Krümmungsbogens [7].

In Ausdruck (1) beziehen sich die  $k$ -ten Punkte auf die Mantellinie des Werkstücks und die  $l$ -ten auf den Wandverlauf im Grundriß.

Die gesamte operative Eingangsinformation über die Geometrie des Werkstücks wird in kodierter Form auf Lochkarten übertragen und vor der Aufgabenlösung in den Rechner eingegeben.

Beim Tiefziehen von Werkstücken ohne Abstreckgleitziehen wird die Wanddickenänderung normalerweise vernachlässigt, und die Abmessungen der Platine werden nach der Werkstückoberfläche unter Berücksichtigung der Schnittzugabe bestimmt. Zur Berechnung der Werkstückoberfläche müssen zuerst die Koordinaten der Krümmungskreismittelpunkte der Mantellinie sowie die Innenkontur im Grundriß ausgerechnet werden;

dies kann man leicht durchführen, indem man z.B. die beiden Gleichungen der Krümmung, in die anstelle der unabhängigen Variablen  $x$  und  $y$  die Koordinaten der vorgegebenen beiden Knotenpunkte des Krümmungsbogens eingesetzt worden sind, gemeinsam gelöst werden. Die gesamte Oberfläche des napfförmigen Werkstücks bestimmt sich aus der Summe der Grundflächen der Zarge mit Hilfe der analytischen Geometrie.

Wir untersuchen die vorgestellte theoretische Methode zur Bestimmung von Form und Abmessungen einer Platine für den ersten Übergang zum Tiefziehen nichtachssymmetrischer napfförmiger Werkstücke mit ebenem Boden.

Im ersten Übergang zum Tiefziehen napfförmiger Werkstücke aus einer Platine treten die größten Umformungen im Flansch des Rohteiles auf. Zur mathematischen Beschreibung des Stoffflusses im Flansch wurden folgende Annahmen getroffen:

- 1) starr-plastisches Werkstoffmodell;
- 2) Wanddickenänderung werden vernachlässigt [1]; ebener Formänderungszustand;
- 3) die Innenkontur des Flansches entspricht der mittleren senkrechten Wandlinie des Werkstücks im Grundriß (Verlauf des Stempels im Grundriß) und hat allgemein die Gestalt einer stückweise-glatte geschlossenen Kurve ohne Eigenüberschneidungspunkte; der während der Aufgabenlösung gesuchte Verlauf des Rohlings ist unendlich gehalten, dabei blieb der plastische Bereich einfach zusammenhängend und der Werkstofffluß stationär.

In der Fließebene wird ein kartesisches Koordinatensystem in  $x$  und  $y$  festgehalten und für die Blechstärke  $l$  angenommen. Bei Vernachlässigung der Massenkräfte nimmt das in Spannungen ausgedrückte Fließgesetz die Form der Gleichgewichtsbedingungen an [1]. Wir setzen die Relationen zwischen den Formänderungsgeschwindigkeiten  $\dot{\epsilon}_x, \dot{\epsilon}_y, \dot{\gamma}_{xy}$  und den Komponenten des Spannungstensors  $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$  [1], die durch die Komponenten  $v_x$  und  $v_y$  des Geschwindigkeitsvektors  $\vec{v}$  und die Stromfunktion  $\psi(x, y) : v_x = \partial\psi/\partial y, v_y = -\partial\psi/\partial x$  ausgedrückt werden, in die Gleichgewichtsbedingungen ein, eliminieren die mittlere Normalspannung  $\sigma = (\sigma_x + \sigma_y)/2$

und erhalten für die Funktion eine Grundgleichung vierter Ordnung in partiellen Ableitungen. In Vektorschreibweise  $\omega(x, y)$  nehmen die Gleichgewichtsbedingungen folgende Form an [2]:

$$\omega = \frac{\partial v_y}{\partial x} - \frac{\partial v_x}{\partial y}$$

die Grundgleichung teilt man zweckmäßigerweise in zwei Hilfsgleichungen auf:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} &= -\omega; \\ \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} &= \frac{1}{\mu} \left[ \left( \frac{\partial^2 \mu}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \mu}{\partial y^2} \right) \left( \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} \right) + \right. \\ &\left. + 4 \frac{\partial^2 \mu}{\partial x \partial y} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x \partial y} - 2 \frac{\partial \mu}{\partial x} \frac{\partial \omega}{\partial x} - 2 \frac{\partial \mu}{\partial y} \frac{\partial \omega}{\partial y} \right], \end{aligned} \right\} (2)$$

mit  $\mu = \mu(x, y)$  für die Steifigkeitszahl ( $\mu = \sigma_n / 3\epsilon_n$ );  $\sigma_n$  und  $\epsilon_n$  für die Größe der Spannungen und der Formänderungsgeschwindigkeiten [1].

Zur Untersuchung des Stoffflusses im Flansch formulieren wir eine Randwertaufgabe: in der Umgebung der Innenkontur  $L$  ist die Lösung von Gleichung (2) gesucht, die die folgenden Grenzbedingungen erfüllt:

$$\left. \begin{aligned} 1) \psi|_L &= v_0 l'; & 2) v_x|_\infty &= \frac{\partial \psi}{\partial y} \Big|_\infty = 0; & v_y|_\infty &= -\frac{\partial \psi}{\partial x} \Big|_\infty = 0; \\ 1) \omega|_L &= 0; & 2) \omega|_\infty &= 0. \end{aligned} \right\} (3)$$

Die erste Grenzbedingung für die Stromfunktion bezeichnet den vorgegebenen Werkstoffverbrauch durch den Abschnitt des inneren Verlaufs mit der Länge  $l'$ , die von der mittleren Stromlinie  $\psi(x, y) = 0$  abgezogen wird. Daß die Geschwindigkeitsverteilung gleich null ist, folgt aus der Bedingung, daß der Geschwindigkeitsvektor des Werkstoffs beim Tiefziehen von Werkstücken mit ebenem Boden auf der Normale in Umlaufrichtung verläuft, längs des Verlaufs konstant und gleich dem Geschwindigkeitsmodul der Bewegung  $v_0$  des Ziehstempels ist [6]. Im Unendlichen sind Geschwindigkeitsvektor und -wirbel gleich null; beim Lösen des Problems werden diese Grenzbedingungen in ausreichend großem Abstand vom Verlauf vorgegeben [3].

Zur Integration der Randwertaufgabe (2) - (3) mit numerischen Methoden führen wir auf der Strömungsebene ein rechteckiges Differenzengitter ein, dessen zentralem Knotenpunkt mit der Markierung  $i, j$

die Abszisse  $x_i = (i-1)h$ , ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) und die Ordinate  $y_j = (j-1)d$ , ( $j = 1, 2, \dots, S_1$ ) entsprechen, wobei  $h$  und  $d$  die Abstände von den Achsen  $ox$  und  $oy$  bezeichnen.

Danach muß man die Anfangsverteilung (erste Näherung) in allen Gitterpunkten des Strömungsbereiches zur Integration  $n = 1$  der Funktionen  $\omega_{i,j}$  und  $\psi_{i,j}$  angeben, wobei durch die richtige Wahl der Anfangsverteilung die Anzahl der Iterationen bei der Berechnung im Rechner stark vermindert wird. Die Anfangsverteilung für die Geschwindigkeitsverteilung wurde gleich null angenommen:  $\omega_{i,j/n=1} = 0$ ; dabei ist sichergestellt, daß die Grenzbedingungen im Verlauf, im Unendlichen (an den Grenzlinien des Differenzengitters) und auf den Symmetrieachsen erfüllt werden. Die Anfangsverteilung für die Stromfunktion wurde linear gewählt in tangentialer Richtung bezüglich dem Koordinatenbeginn (bemerkt sei, daß die Achse  $oy$  als nullte Stromlinie angenommen wurde); dadurch wird sichergestellt, daß die Grenzbedingungen im Unendlichen und auf den Symmetrieachsen erfüllt werden und der Übergang zur Zuschnittform ausreichend glatt ist.

Ausgehend von der vorgegebenen Innenkontur bis zu den Grenzlinien des Differenzengitters muß man diesen Verlauf für den Rechengang durch ein Gitter approximieren, dessen Punkte aus der Außenkontur bestehen oder in ihrer Nähe liegen (bei einem ausreichend engmaschigen Gitter besitzt eine derartige Approximation keine großen Fehler).

Nach Arbeit [4] müssen desweiteren die beiden Gleichungen des Systems (2) in dimensionsloser (mit Strichen über den Buchstaben) Differenzenform geschrieben und bezüglich der Werte  $\bar{\psi}_{i,j}$  und  $\bar{\omega}_{i,j}$  im zentralen Gitterpunkt  $i,j$  gelöst werden. Das ermittelte System nichtlinearer algebraischer Gleichungen für die gesuchten Funktionen in den Gitterpunkten, das durch die Grenzbedingungen (3) in Differenzenform abgeschlossen wird, ist durch Iterationen zu lösen: nach der vorgegebenen ersten Näherung wird die zweite Näherung für die Stromfunktion und die Geschwindigkeitsverteilung in allen Gitterpunkten innerhalb des plastischen Bereiches berechnet, wobei man die vorgegebenen Werte derselben Funktionen an der Grenze des plastischen Bereiches verwendet; danach wird der Rechengang wiederholt und nach der zweiten Näherung die

dritte Näherung berechnet. Der Iterationsprozeß wird so lange wiederholt, bis eine bestimmte vorgegebene relative Fehlergröße  $\delta$  der errechneten Werte der Funktionen zwischen zwei aufeinanderfolgenden Näherungen (Iterationen) erreicht wird. In der vorliegenden Arbeit wurde  $\delta=10^{-2}-10^{-3}$  angenommen. Um sicherzugehen, daß der Iterationsprozeß konvergiert, wurde die Methode aus [5] verwendet.

Nach dem erarbeiteten Blockschaltbild des Algorithmus muß man danach die genannten Formeln für die Komponenten  $v_x$  und  $v_y$  des Geschwindigkeitsvektors durch die Stromfunktion in dimensionsloser Differenzenform anschreiben und in allen Gitterpunkten im und am Rande des plastischen Bereiches (mit Ausnahme der Außenkontur), sowie auf den Strömungslinien die Werte der Komponenten  $(\bar{v}_x)_{i,j}$ ,  $(\bar{v}_y)_{i,j}$  und des Geschwindigkeitsvektors  $\bar{v}_{i,j}$  selbst ausrechnen. Auf der Außenkontur kann man die Werte der Komponenten des Geschwindigkeitsvektors leicht nach den Formeln  $\bar{v}_x = \cos \varphi$ ,  $\bar{v}_y = \sin \varphi$  ausrechnen, wobei  $\varphi$  den Winkel zwischen der Achse  $ox$  und dem auf der Kontur senkrecht stehenden Geschwindigkeitsvektor bezeichnet; die Werte  $\bar{v}_x$  und  $\bar{v}_y$  sind auf die in der Nähe der Kontur liegenden Knotenpunkte des Gitters zu übertragen.

Die gefundenen Stromlinien und das Geschwindigkeitsfeld im Flansch können zur Berechnung der für die Praxis wichtigen Kennwerte des Tiefziehvorgangs und insbesondere zur Bestimmung der Platinenform verwendet werden. Die Platinenform, für die die Zarge am fertigen Werkstück gleiche Höhe haben muß, stellt eine geschlossene Linie im Flansch dar, dessen gesamte Punkte gleichzeitig auf die Innenkontur ausgerichtet sind. Wenn man die Stromlinien durch Strecken approximiert, die durch die Schnittpunkte der Stromlinien mit den Gitterlinien auf die Innenkontur ausgerichtet sind, und die Werte der Geschwindigkeitsvektoren mittelt, kann man leicht die entsprechenden Strömungszeitabschnitte des Werkstoffs bestimmen. Wenn man desweiteren irgendeine Zeit  $T$  vorgibt und diesen Wert von der Innenkontur an allen Stromlinien entlang abträgt, kann man auf den Stromlinien die Koordinaten der Punkte bestimmen, die gleichzeitig in der Zeit  $T$  auf die Innenkontur ausgerichtet sind. Wenn man die ermittelten Punkte miteinander verbindet, erhält man das Bild der Zuschnittsform.

Wenn man verschiedene Zeiten  $T$  vorgibt, kann man eine Schar von Zuschnittsformen konstruieren. Für die konkreten Abmessungen eines Werkstücks wird aus der Schar der errechneten Zuschnittsformen jene ausgewählt, dessen Fläche nicht größer ist als die Fläche des Werkstückes.

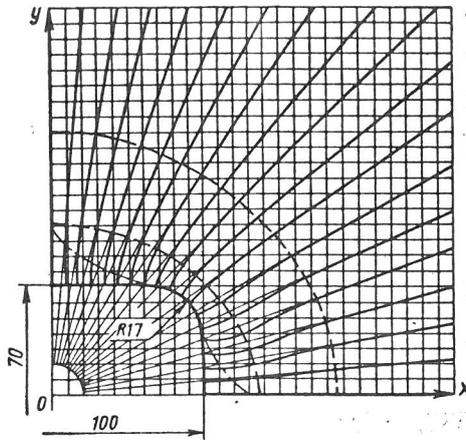


Abb. 2. Bild der Stromlinien (durchgezogene Linien), Platine (äußere gestrichelte Linie) und Verlauf des vorletzten Übergangs (innere gestrichelte Linie) für das Ziehen eines rechteckigen napfförmigen Werkstückes (abgebildet ist der vierte Abschnitt des Strömungsbereichs); durch die Punkt-Strich-Linie werden die starren Zonen abgetrennt, die danach konstruiert wurden, wie sehr die Stromlinien von den parallelen Geraden abweichen.

Abb. 2 zeigt beispielhaft das Bild der Stromlinien (durchgezogene Linien) im Flansch und eine Platine (äußere gestrichelte Linie) für das Tiefziehen eines sehr häufig verbreiteten rechteckigen napfförmigen Werkstückes. Ein Vergleich der theoretisch ermittelten Platine (Abb. 2) mit den Versuchsergebnissen [6] erweist, daß beide gut übereinstimmen.

In Abb. 3 ist ein erweitertes Blockschaltbild für den Algorithmus zur rechnergestützten Planung des Tiefziehens von napfförmigen Werkstücken unterschiedlicher Form aus Blechen in mehreren Stufen ohne Wanddickenminderung abgebildet. Der Block 1 stellt die Eingabe der Betriebseingabedaten sicher [7]. Die Darstellungsform (Kodierform) der Ausgangsinformation zur Lösung der jeweiligen Aufgabe wurde oben angesprochen.

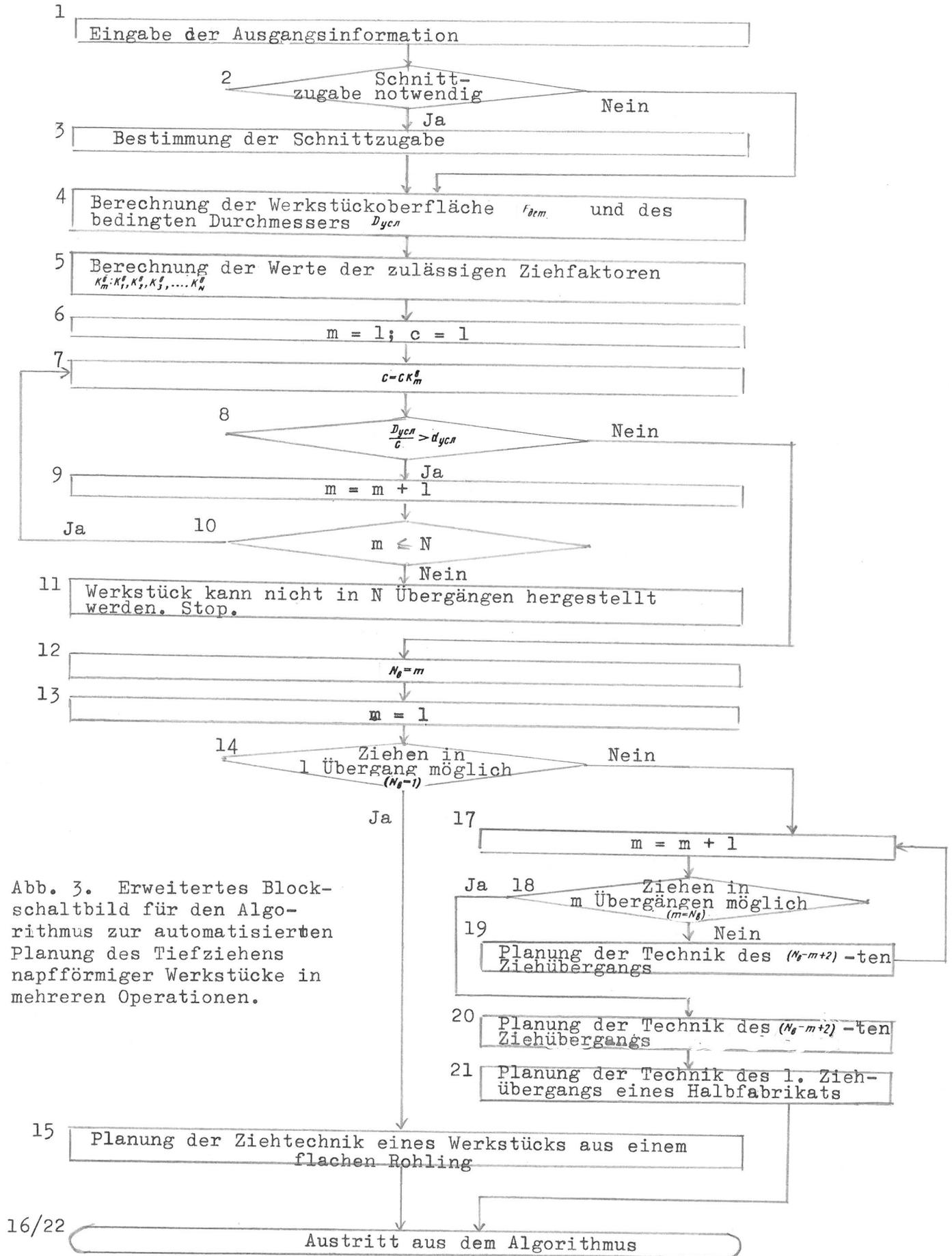


Abb. 3. Erweitertes Blockschaltbild für den Algorithmus zur automatisierten Planung des Tiefziehens napfförmiger Werkstücke in mehreren Operationen.

Die Blöcke 2 und 3 (Abb. 3) sind zur Bestimmung der Schnittzugabe nach den einschlägigen Angaben [8] bestimmt. Ob eine Schnittzugabe notwendig ist, wird vom Techniker festgestellt, der diese dann kodiert in den KID eingibt.

Das Verfahren zur Berechnung der Werkstücksoberfläche  $F_{\text{DET}}$  (Block 4) wurde bereits oben beschrieben. Der gedachte Durchmesser des Rohlings  $D_{\text{ycн}}$  wird nach dem Ausdruck [9]  $D_{\text{ycн}} = \sqrt{4F_{\text{DET}}/\pi}$  bestimmt.

Bei solchem Vorgehen kann man die Koeffizienten für das Ziehen napfförmiger Werkstücke unterschiedlicher Gestalt in mehreren Stufen grundrißmäßig annäherungsweise nach denselben Formeln berechnen, die auch für das Tiefziehen zylindrischer Werkstücke gelten:

$$K_1^B = \frac{D_{\text{ycн}}}{d_1^{\text{ycн}}}; K_m^B = \frac{d_{m-1}^{\text{ycн}}}{d_m^{\text{ycн}}},$$

wobei  $d_m^{\text{ycн}}$  die gedachten Durchmesser der napfförmigen Halbfabrikate und des Werkstücks bezeichnet, die nach der Fläche  $F_m^{\text{ycн}}$  berechnet werden, welche in der Ebene durch den Verlauf der m-ten Ziehübergänge begrenzt ist:

$$d_m^{\text{ycн}} = \sqrt{4F_m^{\text{ycн}}/\pi}.$$

Diese Annahme läßt sich zu einem gewissen Grad dadurch rechtfertigen, daß für das Ziehen napfförmiger Werkstücke unterschiedlicher Gestalt grundrißmäßig keine Versuchsangaben über die Ziehfaktoren vorliegen.

Wie beim Tiefziehen zylindrischer Werkstücke werden desweiteren (Block 5) die Werte der zulässigen (maximalen) Ziehfaktoren  $K_m^B$  in allen m-ten Übergängen ( $m = 1, 2, 3, \dots, N_3$ ) nach der Tabelle in [8] in Abhängigkeit von der relativen Platinendicke  $(S/D_{\text{ycн}}) \cdot 100$  berechnet.

In den Blöcken 6 - 12 ist die Berechnung der Anzahl der Stufen (Übergänge) beim Ziehen  $N_3$  zur Herstellung des vorgegebenen napfförmigen Werkstücks vorgesehen.

In Block 14 wird geprüft, ob das Werkstück in einem Übergang gezogen werden kann. Wenn möglich, dann besteht die Planung der Ziehtechnik eines Werkstücks aus einer flachen Platine (Block 15) aus den in unserer Arbeit [7] beschriebenen Schritten.

Wenn das Werkstück nicht in einem Übergang gezogen werden kann, dann wird der Index  $m$  (in Block 13 gleich eins), der zur Durchführung der zyklischen Rechenvorgänge verwendet wird, um eine Einheit größer (Block 17). Ausgehend vom Verlauf des letzten Übergangs (Wandverlauf des Werkstücks im Grundriß) wird die Berechnung von Form und Abmessungen der Übergänge mit dem vorletzten Übergang begonnen.

In Block 18 wird geprüft, ob das Werkstück in  $m$  Übergängen gezogen werden kann (im vorliegenden Abschnitt des zyklischen Rechenvorgangs ist  $m = 2$ ). Wenn in  $m$  Übergängen gezogen werden kann, dann wird in Block 20 die Ziehtechnik des  $(N_b - m + 2)$ -ten Ziehübergangs geplant. Bei  $N_b = 2$  wird in Block 20 die Ziehtechnik des fertigen Werkstücks aus dem Halbfabrikat nach den in Arbeit [7] beschriebenen Methoden geplant; da die Abmessungen des fertigen Werkstücks von der Arbeits-skizze her bekannt sind, sind für diesen Übergang keine geometrischen Berechnungen notwendig.

In Block 21 wird die Technik des  $i$ -ten Ziehübergangs eines napfförmigen Halbfabrikats aus einer Platine geplant.

Beim Bestimmen von Form und Abmessungen der Zwischenübergänge müssen die folgenden beiden Hauptbedingungen berücksichtigt werden:

- 1) die Formänderung im Zentrum der plastischen Umformung darf nicht größer sein als der zulässige Wert  $\epsilon_p$ ;
- 2) die Formänderung längs der Kontur des zu ziehenden Werkstücks oder Halbfabrikats muß konstant sein.

Wenn die erste Bedingung während der Werkstoffumformung nicht erfüllt wird, kommt es zum Bruch des Werkstoffs. Die Erfüllung der zweiten Bedingung basiert darauf, daß längs der Kontur gleichmäßige plastische Werkstoffeigenschaften in jedem Ziehübergang gewünscht sind, wodurch der Ziehvorgang stabiler wird.

Beim praktischen Werkstoffumformen werden sehr häufig Matrizen mit einem flachen, konischen und torusförmigen Arbeitsteil verwendet. Untersuchungen über den Umformvorgang eines Napfes bei den darauffolgenden Ziehübergängen in einer Matrix mit einer Arbeitsaussparung in Form einer Ebene mit radiusförmiger Abrundung. Vom Zeitpunkt der Ausbildung der senkrechten Werkstückwand an bleiben die Abmessungen des Zentrums der plastischen Umformung, das unter einem flachen Andruck zwischen den nichtumgeformten Wandabschnitten des Werkstücks und der Platine steht, unverändert, und folglich kann man den Werkstofffluß im Zentrum der plastischen Umformung als annähernd konstant bezeichnen. Wenn man das Rechenmodell des ebenen Flusses eines starrplastischen isotropen Werkstoffs nimmt und den während der Aufgabenlösung gesuchten Verlauf des Zwischenübergangs unendlich werden läßt, dann läßt sich die Aufgabe (Bestimmung des Werkstoffflusses im Herd der plastischen Umformung beim Umformen eines napfförmigen Halbfabrikats) auf die vorher gelöste Aufgabe (Werkstoffumformung einer Platine) reduzieren.

Der oben festgestellte Werkstofffluss im Zentrum der plastischen Umformung kann zur Berechnung der in der Praxis wichtigen Kennwerte des Ziehvorgangs in mehreren Stufen verwendet werden. Der Verlauf des Ziehübergangs stellt eine geschlossene Linie in der Strömungsebene dar, auf der alle Punkte längs der Stromlinie bis zur Zieh-teilaußenkontur (oder der Kontur des Halbfabrikats) in der Zeit  $t$  die gleiche Formänderung haben:

$$\varepsilon = \int_0^t \dot{\varepsilon}_n d\tau. \quad (4)$$

Der Wert  $\varepsilon$  darf außerdem einen gewissen zulässigen Wert  $\varepsilon_p$  nicht übersteigen, der für die jeweiligen Umformbedingungen charakteristisch

ist ( $\epsilon \leq \epsilon_p$ ). Nach den bekannten Werten für die Größe der Formänderungsgeschwindigkeit  $\dot{\epsilon}_n$  muß man, ausgehend von der Innenkontur, auf allen Stromlinien mittels numerischer Integration von Formel (4) die Punkte bestimmen, die in der Ziehzeit dieselbe Formänderung  $\epsilon = \text{const}$  haben. Die Verbindungslinie zwischen den ermittelten Punkten ist die Kontur des Ziehübergangs. Unter Vorgabe der verschiedenen Werte für  $\epsilon$  kann man die Schar der Konturen des Ziehübergangs konstruieren. Hinsichtlich einer möglichen Zerstörung ist das Ziehteil die Kontur, für deren Punkte die Bedingung  $\epsilon = \epsilon_p$  bestehen bleibt; beim Umformen eines Werkstücks oder Halbfabrikats mit einer solchen Kontur im Grundriß wird der Werkstoff am stärksten beansprucht; die Anzahl der Ziehübergänge ist dann selbstverständlich minimal.

Untersuchen wir die Methode zur Bestimmung des zulässigen Formänderung  $\epsilon_p$ .

Beim Tiefziehen zylindrischer Werkstücke und bei radialem Werkstofffluß im Zentrum der plastischen Umformung kann man auf analytische Weise im polaren Koordinatensystem  $\rho\theta$  die Größe der Formänderung  $\epsilon$  berechnen, die sich durch die Werkstoffpartikel in der Laufzeit längs der Stromlinie von der Platine mit dem Radius  $R_3$  bis zur Kontur des Werkstücks mit dem Radius  $r_0$  ergibt. Dafür sind die Werte der Größe der Formänderungsgeschwindigkeit  $\dot{\epsilon}_n = 2/(\sqrt{3} \dot{\epsilon}_p)$ , der radialen Formänderungsgeschwindigkeit  $\dot{\epsilon}_p = v_0 r_0 / \rho^2$ , der radialen Geschwindigkeit  $v_p = -v_0 r_0 / \rho$  [3] und der Zeitzunahme  $d\tau = d\rho / v_p$  in Formel (4) angegeben, aufgrund deren ermittelt wurde:

$$\epsilon = -\frac{2}{\sqrt{3}} \int_{R_3}^{r_0} \frac{d\rho}{\rho} = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln K_1^B, \quad (5)$$

wobei  $K_1^B = R_3 / r_0$  den Ziefaktor während der ersten Operation bezeichnet.

Da beim Tiefziehen napfförmiger Werkstücke dieselben maximalen Ziefaktoren verwendet werden wie beim Umformen zylindrischer Werkstücke, kann man die Größe der zulässigen Formänderung für alle Übergänge beim Ziehen napfförmiger Werkstücke nach der Gleichung

$$\epsilon_p^{(m)} = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln K_m^B, \quad (6)$$

berechnen, wobei die maximalen Ziehfactoren  $K_m^B$  bereits vorher in Block 5 bestimmt wurden.

Ausgehend vom konstruierten Verlauf des Zwischenübergangs beim Ziehen wird zur Herstellung eines Werkstücks in zwei Ziehübergängen ( $N_s=2$ ) im Block 21 nach dem oben beschriebenen Verfahren die Kontur der Platine berechnet und der gesamte Arbeitsablauf geplant. Die Technik des Tiefziehens von Werkstücken in mehreren Stufen wird bei  $N_s>2$  analog (unter Verwendung von Block 19) durchgeführt, mit dem einen Unterschied, daß der Verlauf z.B. des ersten Übergangs nicht aufgrund der Kontur des fertigen Werkstücks konstruiert wird, sondern anhand der Kontur des zweiten Übergangs.

Als Beispiel ist in Abb. 2 in der Strömungsebene die Kontur (innere gestrichelte Linie) des vorletzten Übergangs beim Ziehen eines rechteckigen Werkstücks dargestellt ( $K_m^B=2,0$ ). Wenn man den theoretischen Verlauf (siehe Abb. 2) des Übergangs mit den in der Praxis erprobten Empfehlungen anderer Verfasser [10] vergleicht, stellt man fest, daß die Ergebnisse gut übereinstimmen. Die dargelegte Methode zur Konstruktion der Form einer Platine, der Übergänge und zur Bestimmung der Anzahl der Ziehstufen kann man nicht nur für die Berechnung der Herstellungstechnik von rechteckigen Werkstücken verwenden, sondern auch zur Herstellung von Werkstücken mit grundrißmäßig verschiedener Gestalt. Das Programm dieser Aufgabe wurde in FORTRAN-IV geschrieben, die Lösungszeit der Aufgabe im Rechner EC-1022 betrug weniger als 5 Min., der Rechenumfang betrug 128 KByte.

Bei der rechnergestützten Planung von Form und Abmessungen einer Platine und der Übergänge zum Ziehen napfförmiger Werkstücke unterschiedlicher Geometrie in mehreren Stufen muß der Werkstechniker ein einfaches Bild der Ausgangsdaten anfertigen, dieses in den Rechner eingeben, und nach der Berechnung im Rechner erhält er nach den aufgestellten Programmen im A/D-Umwandler des Rechners die Koordinaten der Platinenkontur, der Ziehübergänge und andere Informationen, die für die Aufstellung des Arbeitsablaufs beim Kaltumformen notwendig sind.

L i t e r a t u r

1. Сторожев М. В., Попов Е. А. Теория обработки металлов давлением. М., Машиностроение, 1971. 424 с.  
Storožev, M.V., Popov, E.A.  
Teorija obrabotki metallov davleniem.  
Moskva: Verlag "Mašinstroenie", 1971, 424 S.  
Deutsche Übersetzung:  
Storoschew, M.W., Popow, E.A.  
Grundlagen der Umformtechnik. (Übers. aus dem Russ. und deutsche Red. Maria Beyer und Helmut Bönisch.)  
Berlin: Verlag Technik, 1968.
  
2. Седов Л. И. Механика сплошной среды. Т. 1, 2, М., Наука, 1970.  
Sedov, L.I.  
Mechanika splošnoj sredy. Tom 1,2.  
Moskva: Verlag "Nauka", 1970.  
Englische Übersetzung:  
Sedov, Leonid Ivanovič  
A Course in Continuum Mechanics. Transl. from the Russ., ed. by Jens Rainer Maria Radok. Vol. 1-4.  
Croningen: Wolters-Noordhoff Publ., 1971 - 1974.
  
3. Жарков В. А. Кинематика течения фланца заготовки. — Известия ВУЗов. Машиностроение, 1975, № 11, с. 127—130.  
Žarkov, V.A.  
Kinematika tečenija flanca zagotovki.  
In: Izvestija. Vyssšie učebnye zavedenija. Mašinstroenie. Moskva, 1975, Nr 11, S. 127 - 130.  
<Strömungskinetik eines Rohlingsflansches; russ.>
  
4. Панов Д. Ю. Справочник по численному решению дифференцированных уравнений в частных производных. М.—Л., Госиздат, 1951, 183 с.  
Panov, D.Ju.  
Spravočnik po čislennomu rešeniju differencirovannyh uravnenij v častnyh proizvodnyh.  
Moskva/Leningrad: Gosizdat, 1951, 183 S.  
Deutsche Übersetzung:  
Panow, Dimitrij Jurevič  
Formelsammlung zur numerischen Behandlung partieller Differentialgleichungen nach dem Differenzenverfahren. (Übers. aus dem Russ. v. Karl Borkmann u. Werner Schulz.)  
Berlin: Akademie-Verl., 1955.
  
5. Госмен А. Д. и др. Численные методы исследований течений вязкой жидкости. М., Мир, 1972. 326 с.  
Gosmen, A.D. u.a.  
Čislennye metody issledovanij tečenij vjazkoj židkosti.  
Moskva: Verlag "Mir", 1972, 326 S.  
Übersetzung aus dem Englischen:  
Gosman, A.D., Pun, W.M., Runchal, A.K., Spalding, D.B., Wolfshtein, M.  
Heat and Mass Transfer in Recirculating Flows.  
London/New York: Academic Press, 1969, 338 S.

6. Овчинников А. Г., Жарков В. А., Жаркова К. П. Исследование процесса вытяжки прямоугольных изделий из алюминиевой фольги. — Кузнечно-штамповочное производство, 1976, № 6, с. 19—21.

Ovčinnikov, A.G., Žarkov, V.A., Žarkova, K.P.

Issledovanie processa vytjažki prjamougol'nych izdelij iz aljuminievovoj fol'gi.

In: Kuznečno-štamпово́чное производство. Moskva, 18 (1976), Nr 6, S. 19 - 21.

Deutsche Übersetzung:

Untersuchung des Tiefziehvorganges rechteckiger Teile aus Aluminiumfolie. — Zentralinstitut für Information und Dokumentation/Zentraler Übersetzungsnachweis, Berlin/DDR, Nr 237/1527.

7. Тетерин Г. П., Жарков В. А. Автоматизация проектирования технологических процессов вытяжки цилиндрических деталей из листового металла. — Кузнечно-штамповочное производство, 1977, № 10, с. 15—18.

Teterin, G.P., Žarkov, V.A.

Avtomatizacija proektirovanija tehnologičeskich processov vytjažki cilindričeskich detalej iz listovogo metalla.

In: Kuznečno-štamпово́чное производство. Moskva, 19 (1977), Nr 10, S. 15 - 18.

⟨Automatische Planung der technischen Vorgänge beim Tiefziehen zylindrischer Fertigungsteile aus Blechen; russ.⟩

8. Романовский В. П. Справочник по холодной штамповке. Л., Машиностроение, 1971. 783 с.

Romanovskij, V.P.

Spravočnik po cholodil'noj štamповке.

Leningrad: Verlag "Mašinstroenie", 1971, 783 S.

Deutsche Übersetzung:

Romanovskij, Viktor Petrovič

Handbuch der Stanzereitechnik.

Berlin: Verlag Technik, 1959.

9. Лисицын В. Д., Андреева В. Н., Тянутов А. Г. Экспериментальное исследование вытяжки коробчатых изделий. — Кузнечно-штамповочное производство, 1965, № 12, с. 20—23.

Lisicyn, V.D., Andreeva, V.N., Tjanutov, A.G.

Eksp'erimental'noe issledovanie vytjažki korobčatych izdelij.

In: Kuznečno-štamпово́чное производство. Moskva, 7 (1965), Nr 12, S. 20 - 23.

⟨Experimentelle Untersuchung des Tiefziehens napfförmiger Werkstücke; russ.⟩

10. Вайнтрауб Д. А. и др. Расчет технологического процесса глубокой вытяжки с помощью ЭВМ. — «Кузнечно-штамповочное производство», 1971, № 5, с. 17—20.

Vajntraub, D.A. u.a.

Rasč'et tehnologičeskogo processa glubokoj vytjažki s pomošč'ju EVM.

In: Kuznečno-štamпово́чное производство. Moskva, 13 (1971), Nr 5, S. 17 - 20.

⟨Rechnergestützte Berechnung des technischen Vorgangs Tiefziehen; russ.⟩

Stuttgart, den 26. August 1980

übersetzt von

**Übersetzungsstelle  
der Universitätsbibliothek Stuttgart**

*Ottmar Pertschi*  
(Ottmar Pertschi)  
Dipl.-Übersetzer