

Konjuševskaja, R.I., Davydov, Ju.D., Petrov, L.N.

RECHNERUNTERSTÜTZTE BESTIMMUNG DER OPTIMALEN FORM DES
SCHMIEDESTÜCKS FÜR EIN ABGESTUFTES TEIL

Übersetzung aus:

Kuznečno-šampovočnoe proizvodstvo. Moskva, 1968, Nr 4,
S. 3 - 6.

Russ.: **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ ФОРМЫ КОВАННОЙ ПОКОВКИ
ДЛЯ СТУПЕНЧАТОЙ ДЕТАЛИ ПРИ ПОМОЩИ ЭВМ**

Opredelenie optimal'noj formy kovanoj pokovki
dlja stupenčatoj detali pri pomošči EVM

Die Anwendung eines Rechners und mathematischer Rechenmethoden beim rechnerunterstützten Entwurf eines Schmiedestücks gestattet es, nicht nur hochqualifizierte Fachleute von unproduktiver Arbeit zu befreien, sondern auch Werkstoff zu sparen.

Zur Lösung dieser Aufgabe sind die Informationen über die Geometrie des Fertigteils und eine Reihe anderer notwendiger technologischer Daten in Form von Zahlenkodes in den Rechner einzugeben. Als Hauptquelle dieser Informationen dient die Zeichnung des Fertigteils. Da das Kodieren der Zeichnungen (Auflisten der Information) bislang manuell durchgeführt wird, muß das Kodierungssystem ausreichend einfach sein. Außerdem muß dieses System das Kodieren jener Daten gewährleisten, die notwendig sind, um Algorithmen und Programme zum

rechnerunterstützten Entwurf der Schmiedestückzeichnung zu erarbeiten, wobei die Schmiedestückzeichnung mit Hilfe eines üblichen Rechners durchgeführt wird.

Vom technologischen Standpunkt aus ist das wichtigste Strukturelement des abgestuften Werkstücks das zu bearbeitende Oberflächenelement (BOE). Die Form des Teils wird gekennzeichnet durch die Arten und räumlichen Lagen des BOE und dadurch, in welcher Beziehung sie zueinander stehen. Deshalb dienen die Charakteristiken eines jeden BOE als Hauptinformationen zur Beschreibung des zu bearbeitenden Werkstücks.

Das abgestufte Werkstück kann einen runden oder rechteckigen Querschnitt haben. In Abhängigkeit von der Art des Querschnitts wird das Teil durch zwei oder drei Größen bestimmt: Wenn das Werkstück einen runden Querschnitt hat, durch zwei, d.h. durch den Durchmesser d_j und die Länge l_j ; wenn das Werkstück einen rechteckigen Querschnitt hat, durch die Breite a_j , die Höhe b_j und die Länge l_j . Je nach den Besonderheiten zur Herstellung des Schmiedestücks ist es zuweilen erforderlich, zusätzliche Bearbeitungskennwerte einzugeben. In diesem Fall sind es Informationen, die das gesamte Teil betreffen, nämlich die Zerspan- und Prüfgrößen, die je nach Aufgabenstellung vorgegeben werden. Die Gestalt des Teils wird durch die Abmessungen der einzelnen Stufen und ihre Lage zueinander bestimmt. Die Kennwerte eines jeden BOE müssen den Forderungen von GOST¹⁾ entsprechen. Nach diesen Forderungen wird der Algorithmus zur Bestimmung der optimalen Schmiedestückzeichnung für ein abgestuftes Werkstück aufgestellt.

Die Methode zur Bestimmung der Schmiedestückzeichnung für Teile mit runden, rechteckigen und gemischten Querschnitten ist ein und dieselbe. Für Teile mit rechteckigen und gemischten Querschnitten gibt es jedoch einige Besonderheiten. Da es möglich ist, daß Höhe, Breite oder Durchmesser der Stufen dieser Teile gleich sind, wird es notwendig, einen zusätzlichen Algorithmus auszuarbeiten, der es gestattet, zwei gleiche Maße für die Länge auf ein und derselben Stufe zu vermeiden.

1) GOST - sowj. Norm: Staatlicher Unions-Standard

Zur Bewertung, ob die erarbeitete Schmiedestückvariante optimal ist, muß man Kriterien auswählen. Bei manueller Bestimmung basiert die Wahl der optimalen Lösung normalerweise auf der Intuition oder Erfahrung des Technologen. In unserem Fall wurde als Hauptkriterium für das Optimum der ausgearbeiteten Variante der Schmiedestückzeichnung der Koeffizient der Gewichtsgenauigkeit gewählt, der den "Anteil" des Fertigteils am Schmiedestück angibt.

Die Parameter des Teils (a, b, d, l) müssen den GOST-Forderungen entsprechen. Falls notwendig, wurden sie auf ein größeres GOST-Maß vergrößert.

Alle Durchmesser des Teils hängen untereinander eng zusammen. Die Veränderung von einem Kennwert einer Stufe kann eine Verletzung der GOST-Forderungen in Bezug auf den entsprechenden Kennwert der Nachbarstufe nach sich ziehen. Als anschauliches Beispiel dafür kann das in Abb. 1 dargestellte Teil dienen.

Aus GOST 7062-54 ist bekannt, daß der Unterschied zwischen den Radien benachbarter Stufen eines Schmiedestücks mindestens 13 mm sein muß. Damit das Schmiedestück dieses Teils der GOST-Forderung

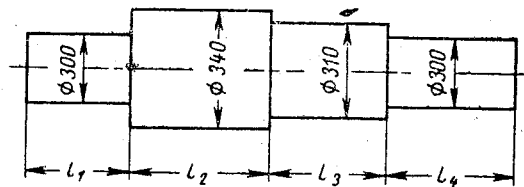


Abb. 1

entspricht, muß man entweder den Durchmesser 310 mm auf 326 mm vergrößern und dann den Durchmesser 340 mm entsprechend auf 352 mm, oder man muß den Durchmesser 330 mm auf 310 mm vergrößern. Somit sind zwei Lösungswege möglich. Wenn man die Aufgabe in Bezug auf alle GOST-Forderungen untersucht, dann ist es möglich, daß noch eine ganze Reihe von Lösungen auftaucht, von denen eine jede durch die Menge des Werkstoffs bestimmt wird, die zu den "Überdeckungen" hinzukommt. Die Schmiedestückzeichnung mit den kleinsten Maßen bestimmt ihre beste Gestaltsvariante. Der allgemeine Algorithmus zum Entwurf des Schmiedestücks eines beliebigen abgestuften Werkstücks wurde nach einem Universal-Blockschaubild aufgestellt (Abb. 2). Bei seiner Aufstellung wurde besonderes Augenmerk auf die Werkstoffeinsparung gelenkt. Wir wollen jeden Schritt des Blockschaubilds einzeln untersuchen.

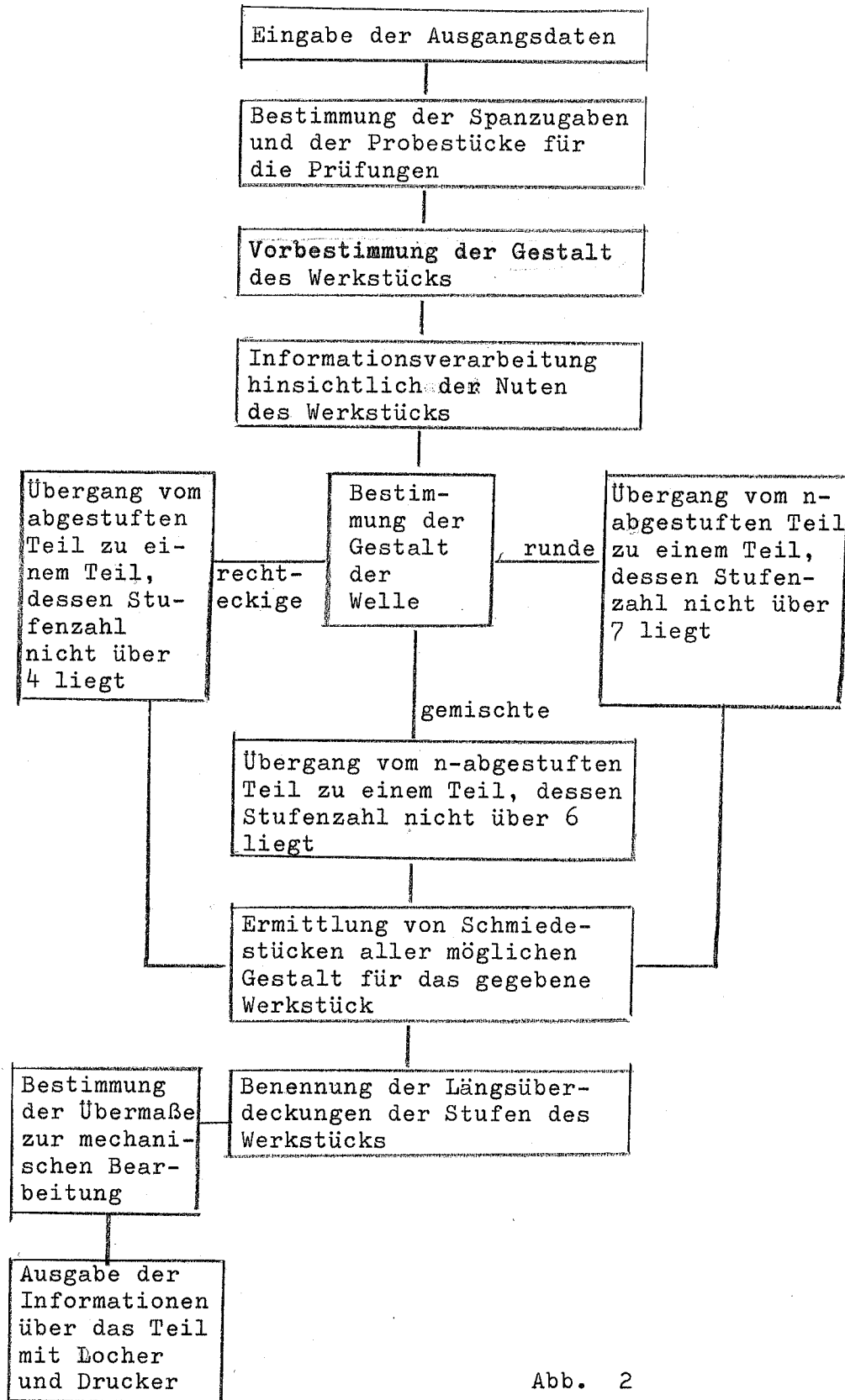


Abb. 2

Im ersten Schritt ist die Eingabe der Ausgangsdaten und die Typenbestimmung des Teils vorgesehen. Der zweite Schritt zur Berechnung der Gestalt des Schmiedestücks ist die Angabe der Spanzugaben und der Prüfstücke für die Prüfungen.

Wenn es nach der Aufgabenstellung erforderlich ist, die Spanzugabe anzugeben, dann ist

1) die Höhe und Breite einer jeden Stufe um $2b$ und der Durchmesser um b zu vergrößern;

2) die Längszugabe zum Spanen einer Stufe in Abhängigkeit von der Art der Stufe anzugeben; die Stufe kann ein Flansch, Bund, Absatz oder eine Nut sein.

Wir setzen voraus, daß die Längszugabe zum Spanen der j -ten Stufe bestimmt werden muß, und daß die Art der Stufe bezüglich der Breite untersucht wird. Wenn die j -te Stufe ein Flansch oder Bund ist, wird die "Überdeckung" folgendermaßen bestimmt.

Wenn der Flansch oder Bund aus einer Stufe besteht, d.h.

$$a_{j-1}(d_{j-1}) < a_j(d_j) > a_{j+1}(d_{j+1}),$$

dann wird seine Länge um die Länge der doppelten Spanzugabe vergrößert.

Wenn sie aus mehreren Stufen bestehen, d.h.

$$a_{j-1}(d_{j-1}) < a_j(d_j) = a_{j+1}(d_{j+1}) = \dots = a_{j+k}(d_{j+k}) > a_{j+k+1}(d_{j+k+1}),$$

dann werden die Längen der äußeren Stufen des Flansches oder Bundes um die Spanzugabe vergrößert.

Wenn der Absatz aus einer Stufe besteht, dann wird seine Länge nicht verändert; wenn er jedoch aus mehreren Stufen besteht, so müssen zwei Varianten untersucht werden:

1) der Absatz befindet sich links, d.h.

$$a_{j-1}(d_{j-1}) < a_j(d_j) = a_{j+1}(d_{j+1}) = \dots = a_{j+k}(d_{j+k}) < a_{j+k+1}(d_{j+k+1}),$$

dann muß die Länge der j -ten Stufe um b vergrößert und die Länge der $j+k$ -ten Stufe um b verringert werden;

2) Wenn sich der Absatz rechts befindet, dann ist die Länge der j -ten Stufe um b zu verringern, und die Länge der $j+k$ -ten Stufe um b zu vergrößern. Wenn die Nut aus einer Stufe besteht,

dann muß ihre Länge um $2b$ verringert werden; wenn sie aus mehreren Stufen besteht, ist jede Länge der äußeren Stufen der Nut um b zu verringern. Die Gesamtlänge des Teils wird um $2b$ vergrößert.

Der dritte Rechenschritt für das Schmiedestück ist dadurch bedingt, daß in Teilen mit rechteckigen und gemischten Querschnitten ihre Gestalt bezüglich Höhe und Breite sich voneinander unterscheiden kann. Deshalb sind die Fälle keine Ausnahme, wo die Stufe bezüglich der Breite eine "Nase" ist, und bezüglich der Höhe ein Absatz oder eine Nut. Dann erhält man bei der Bestimmung der Längs-

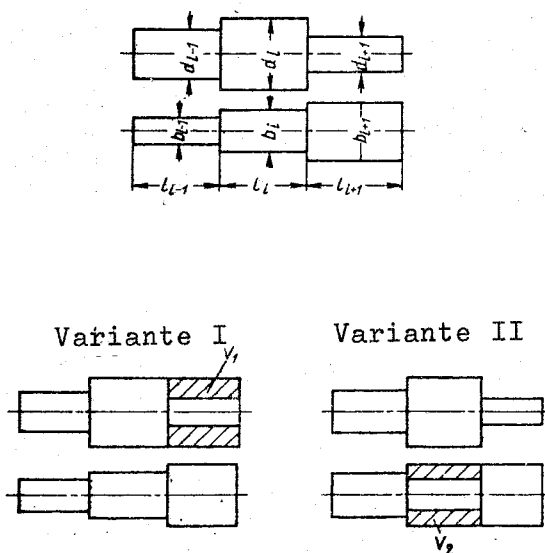


Abb 3.

überdeckung und der Längszugabe der jeweiligen Stufe zwei verschiedene Längen. Um dies zu vermeiden, wurde ein Algorithmus zur Vorbestimmung der Gestalt des Werkstücks aufgestellt. Die Aufgabe dieses Algorithmus besteht darin, daß Höhe und Breite (a_i und b_i , mit $i = 1, 2, \dots, n$) paarweise gleichzeitig abnehmen (zunehmen) oder sich nicht verändern, oder einer der Parameter verändert sich und der andere bleibt bei verändertem i konstant. Wenn gegen diese Bedingungen verstoßen wird, dann wird eine "Überdeckung" bestimmt, d.h. zwei Nachbarabsätze führen zu einem bei minimalem Werkstoffverbrauch. Wir wollen die Berechnung des in Abb. 3 dargestellten Teils untersuchen. In diesem Fall sind zwei Gestaltvarianten mög-

lich. Im ersten Fall a_{i+1} wird der Wert a_j genommen und die Metallmenge hinzugezählt, die auf die "Überdeckung" V_1 fällt. Im zweiten Fall b_i wird der Wert b_{i+1} genommen und das Volumen der "Überdeckung" V_2 hinzugezählt. Wir vergleichen die Volumina V_1 und V_2 und nehmen für die Berechnung die Parameter, die V_{\min} entsprechen.

Der folgende Schritt beim Entwurf des Schmiedestücks ist die Bestimmung der Parameter für die Nut des Werkstücks.

Im Unterschied zu anderen Teilabschnitten (Absatz, "Nase", Flansch, Bund) sind die Maße der Nut nicht durch GOST 7062-54 vorgeschrieben. Ihre Ausführungsbedingungen sind durch die Konstruktionseigenschaften der technischen Ausrüstung und des Werkzeugs bestimmt. Die wichtigste Beschränkung, welche die Möglichkeit bezeichnet, eine Nut herzustellen, ist die Werkzeugbreite. Schmiedepressen sind in Regel mit mehreren Werkzeugsätzen (Stempeln) ausgestattet. Sie werden in verschiedenen Breiten hergestellt und gestatten es, die der Form und den Maßen nach vielfältigsten Schmiedestücke herzustellen. Unter den Bedingungen der Kleinserienproduktion ist eine solche Universalität der Stempel sehr nützlich, da es die Schmieden und Pressereien von überflüssigen Kosten für die Herstellung von Spezialwerkzeug befreit. Wenn also die Länge der Nut des Werkstücks kleiner ist als die Werkzeugbreite, so wird die Nut am Schmiedestück nicht ausgeführt. Zur Ausführung einer Nut müssen die Maße des zur Nut benachbarten Mindestquerschnitts bestimmt werden. Danach muß der notwendige Unterschied der benachbarten Durchmesser mit dem Mindestunterschied nach GOST 7062-54 verglichen werden. Wenn die angegebene Länge l_{ang} der Nut gleich oder größer ist als die Werkzeugbreite $B_{\text{Werkz.}}$, dann wird die Nut mit den Kennwerten $d_j, (a_j, b_j) l_j$ ausgeführt. Im entgegengesetzten Fall werden a_j, b_j oder d_j solange vergrößert, bis diese Bedingung erfüllt ist.

Zur Ermittlung der wissenschaftlich begründeten Anzahl von Stufen eines Schmiedestückes müssen eigenständige Untersuchungen durchgeführt werden. Als Kriterium für die Wahl der Stufenzahl eines Schmiedestückes muß offenbar sein Selbstkostenpreis dienen. Die vorliegende Arbeit behandelt die Optimierung der gültigen Methode zur Berechnung eines Schmiedestückes. Zur Bestimmung der

maximalen Stufenzahl eines Schmiedestücks wurden die in den Werkstätten gewonnenen technischen Erkenntnisse untersucht. Die Auswertung der ermittelten Angaben hat gezeigt, daß die größte Stufenzahl an einem Schmiedestück mit runden Querschnitt bei sieben liegt, bei gemischtem und rechteckigem (quadratischem) Querschnitt bei sechs bzw. vier. Es wurde festgestellt: wenn das Werkstück eine ausreichendgroße Stufenzahl besitzt, dann kann man unter ihnen diejenigen herausuchen, bei denen die Länge und die Durchmesserunterschiede (Breite, Höhe) relativ gering sind. Deshalb werden beim Übergang von einem Teil mit einer Stufenzahl über 4, 6, 7 zu einem Schmiedestück, das eine entsprechend gleiche Stufenzahl oder weniger als 4, 6, 7 Stufen hat, die Überdeckungsvolumina hinzugezählt. Nach Hinzuzählen aller Überdeckungsvolumina wird das geringste ausgewählt, und zwei Stufen durch eine ersetzt. Somit erhält man ein Teil, dessen Stufenzahl um Eins usw. geringer ist, bis die Stufenzahl die aufgestellten Forderungen erfüllt.

Bei der Bestimmung der Maße von Schmiedestück ist es schwierig, die "Überdeckungen" für die Durchmesser, Länge, Höhe, Breite der Stufen zu bezeichnen, deren Maße nicht den GOST-Forderungen entsprechen. Diese Schwierigkeiten lassen sich dadurch erklären, daß die Aufgabe in allgemeiner Form gelöst wird und es unmöglich ist, alle möglichen Kombinationen von Durchmessern (Höhe, Breite) in Betracht zu ziehen. Beim Lösen dieser Aufgabe ist es nicht weniger wichtig, die "Überdeckungen" so zu bestimmen, daß das Volumen des Schmiedestücks minimal ist. An die Höhe der Absätze und Nuten werden die folgenden Beschränkungen gestellt:

$$h_i \geq a; \\ i = 1, 2, \dots; n - 1,$$

mit h_i - faktischer Wert der Durchmesserunterschiede des Werkstücks;
 a - Unterschied der Durchmesser nach GOST.

Im entgegengesetzten Fall wird der kleinere der Durchmesser zum größeren hinzugenommen oder der größere Durchmesser vergrößert, bis h nicht mehr gleich a ist. An die Länge eines jeden Halses werden Beschränkungen nach unten gestellt. Wenn die Länge einer jeden Stufe l_1, l_2, \dots, l_n sind und die Beschränkungen für sie C_1, C_2, \dots, C_n sind, dann müssen die folgenden Bedingungen erfüllt sein: $l_1 \geq C_1, l_2 \geq C_2, \dots, l_n \geq C_n$. Im entgegengesetzten Fall

wird entweder die Länge bis auf die entsprechende Beschränkung vergrößert, oder die beiden entsprechenden Stufen werden auf eine reduziert. Das Volumen des Schmiedestücks bestimmt man durch Summieren der Volumina seiner Stufen

Bei nebeneinander liegenden Stufen sind alle Überdeckungswerte miteinander verbunden. Die Bestimmung der "Überdeckung" für eine der Stufen kann den Unterschied oder die Länge der Stufe eines anderen angrenzenden Halses verringern. Deshalb ist es unmöglich, die "Überdeckungen" für jede Stufe einzeln anzugeben. Es muß festgestellt werden, welche Werte der Durchmesser einer beliebigen Stufe des Teils in allgemeiner Form annehmen kann. Der Durchmesser der j -ten Stufe d_j kann die Werte von beliebig größeren Stufendurchmessern des Teils annehmen, da Fälle möglich sind, wo die Länge von Zwischenstufen so gering ist, daß es rationeller ist, alle Stufen auf eine zu reduzieren. Wenn der Wert d_j größer ist als der Durchmesser der benachbarten Stufe, und ihre Differenz kleiner a , dann muß d_j den Wert $d_{j-1}+26$ oder $d_{j+1}+26$ annehmen, je nachdem welcher davon kleiner als d_j ist und die Differenz zwischen welchen Werten kleiner als a sein wird.

Wir stellen die Werte der Durchmesser einer jeden Stufe des Werkstücks so auf, daß sie untereinander übereinstimmen, und erhalten eine Reihe möglicher Schmiedestückgestalten, bei denen die GOST-Forderungen bezüglich des Unterschiedes bereits erfüllt sind und die notwendigen Längsüberdeckungen, wenn zwei Stufen auf eine reduziert werden, berücksichtigt sind, Somit sind alle Überdeckungsarten außer einer (Vergrößerung der Stufenlänge) berücksichtigt. Wir vergrößern die Länge der Stufen, wo dies notwendig ist, und erhalten Schmiedestückzeichnungen für das jeweilige Werkstück, welche den technischen Forderungen von GOST 7062-54 entsprechen.

Wir analysieren die Schmiedestücke einer jeden Gestalt und vergrößern die Länge der Stufen (wo dies notwendig und möglich ist) und zählen ihre Volumina zusammen. Wir vergleichen die ermittelten Volumina und wählen davon das kleinste aus. Wenn wir die dem kleinsten Volumen entsprechenden Werte nehmen, erhalten wir danach das Schmiedestück mit optimaler Gestalt für das gegebene Werkstück.

Die beschriebene Methode stellt eine Mehrschrittmethode der dynamischen Programmierung dar, wie sie für diese Aufgabe verwendet wurde. Dieser Methode liegt die Vorstellung zugrunde, eine beliebige

konkrete Aufgabe als Ersatz für die ihr ähnlichen Aufgaben zu untersuchen. Dies gestattet es, die ursprüngliche mehrdimensionale Aufgabe über die Funktionalminimierung durch eine Aufgabe zur Lösung des Systems n der Beziehungen, welche die Funktion einer beträchtlich kleineren Anzahl von Variablen einschließt, zu ersetzen. Funktional ist in diesem Fall die funktionale Abhängigkeit des Schmiedestückvolumens von den Kennwerten des gegebenen Teils:

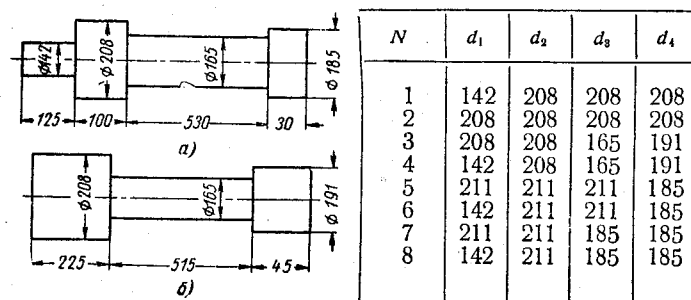
$$f_j(p, q) = \min \left[\frac{\pi}{4} d_j^2 (l_j + \Delta s) + f_{j-1}(x_j, l_j + \Delta s) \right]$$

$f_0(p, q) = 0$ bei beliebigen p, q ,

mit $f_j(p, q)$ - minimales Volumen des linken Teils des Schmiedestückes bis zum $j+1$ -ten Hals unter der Bedingung, daß der Durchmesser und die Länge des $j+1$ -ten Halses entsprechend gleich p und q sind.

Als Beispiel wollen wir ein vierstufiges Werkstück untersuchen (Abb. 4a). Die Gestaltungsvarianten des Teils sind in diesem Fall in der Tabelle beschrieben (Maße in mm).

Abb. 4



Nach der Bestimmung der Längsüberdeckung der Stufen und der Wahl des Werkstücks mit geringstem Gewicht aus allen Schmiedestückvarianten erhalten wir das Schmiedestück, dessen Gestalt in Abb. 4b dargestellt ist.

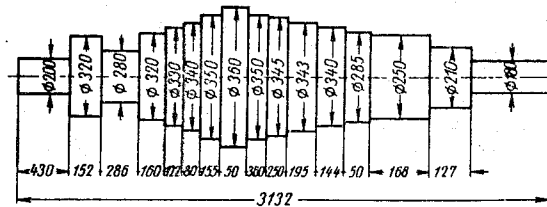
Der Schlußschritt in der Berechnung des Schmiedestück ist die Bestimmung der Spanzugaben nach GOST.

Wenn wir berücksichtigen, daß im vorhergehenden Algorithmus die "Überdeckungen" unter Berücksichtigung der Zugaben angegeben wurden, dann widerspricht dieser Rechenschritt nicht den oben dargelegten Erörterungen. Dabei ist die Reihenfolge bezüglich der Durchmesser analog zur Berechnung in Bezug auf die Breite und Höhe

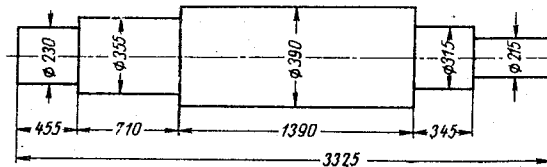
der Werkzeugstufen. Folglich ist der beschriebene Algorithmus in gleichem Maße auch für die Berechnung eines Teils mit rechtwinkligem Querschnitt brauchbar. Die Algorithmen zur Berechnung der Gestalt von Werkstücken mit rechteckigem und gemischtem Querschnitten wurden so aufgestellt, daß zuerst die Höhe aller Stufen und danach ihre Breite berechnet wird.

Die erarbeiteten Algorithmen und Rechenprogramme werden experimentell überprüft. Die Rechenergebnisse für die Schmiedestücke mit verschiedenen Gestalten wurden mit Hilfe des Rechners ermittelt.

Werkstück



Schmiedestück, vom Techniker berechnet



Schmiedestück, mit Rechner bestimmt

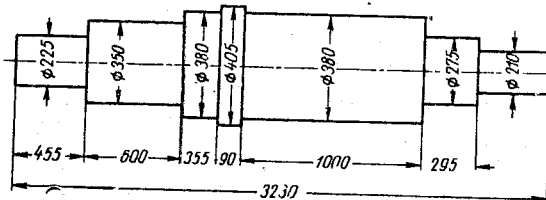


Abb. 5

Als Beispiel untersuchen wir die Ausarbeitung des Schmiedestücks eines sechzehnstufigen Werkstücks mit rundem Querschnitt (Abb. 5).

Diese Rechnung ermöglicht es, infolge der rationellen Stufenwahl des Schmiedestücks 200 kg Werkstoff zu sparen. Dabei veränderte sich der Arbeitsaufwand für seine Herstellung in der Schmiede und Presserei kaum, aber die Bearbeitungszeit in der spanenden Abteilung wurde beträchtlich verkürzt.

Somit erlaubt es das erarbeitete System mit Hilfe des Rechners den Metallverbrauch um 8 - 10 % zu senken, verglichen mit einem gebräuchlichen System.

Stuttgart, den 7. Februar 1977

übersetzt von

Ottmar Pertschi

(Ottmar Pertschi)
Dipl.-Übersetzer