

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Գ. Լ. ПЕТРОСЯН, Դ. Գ. ПЕРСЕСЯН

ОБ ОДНОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
ПРОЦЕССОВ ФОРМОВАНИЯ ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ
В КОНИЧЕСКИХ МАТРИЦАХ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ
ЭЛЕМЕНТОВ

В работах [1, 2] приведены основные зависимости метода конечных элементов для решения задач формования пористых цилиндрических заготовок при свободной осадке и прессовании их в жестких цилиндрических и конических матрицах. Созданные при этом вычислительные программы позволяют решать широкий класс осесимметричных задач уплотнения и формоизменения пористых заготовок.

Большой интерес представляет дальнейшее усовершенствование вычислительных программ и использование их для решения других осесимметричных задач.

В настоящей работе, с целью исследования методом конечных элементов процессов формования цилиндрических порошковых заготовок в конических матрицах, приведено описание и применение одной из вычислительных программ, при помощи которой при указанных размерах заготовки и количестве элементов осуществляется автоматическое разделение заготовки на треугольные конечные элементы.

Описание формул и их подробный анализ освещены в [1, 2]. Отметим лишь, что проведенные в данной работе исследования основаны на зависимостях теории пластичности реальных пористых материалов.

Блок-схема вычислений показана на рис. 1. Сначала вводятся исходные данные (механические характеристики материала: параметры аппроксимированной диаграммы деформирования A , B , b и пористости материала m , n ; величина коэффициента Пуассона ν ; начальная пористость материала μ_0 и т. д.), на основании которых формируются следующие матрицы: $[D]$ — устанавливающая связь между векторами столбцами напряжений $\{\sigma\}$ и приращений деформации $\{d\varepsilon\}$; $[B]$ — связывающая между собой векторы-столбцы приращений деформаций $\{d\varepsilon\}$ и узловых перемещений $\{d\delta\}$; $[k]^e$, $[k]$ — матрицы жесткостей конечных элементов и всей конструкции.

При этом составляются уравнения равновесия узлов сетки конечных элементов. Получается система алгебраических уравнений, в которую входят приращения узловых перемещений и узловых усилий. Для

того, чтобы составление системы алгебраических уравнений было автоматизировано, вокруг деформированной заготовки образуем слой нулевой жесткости.

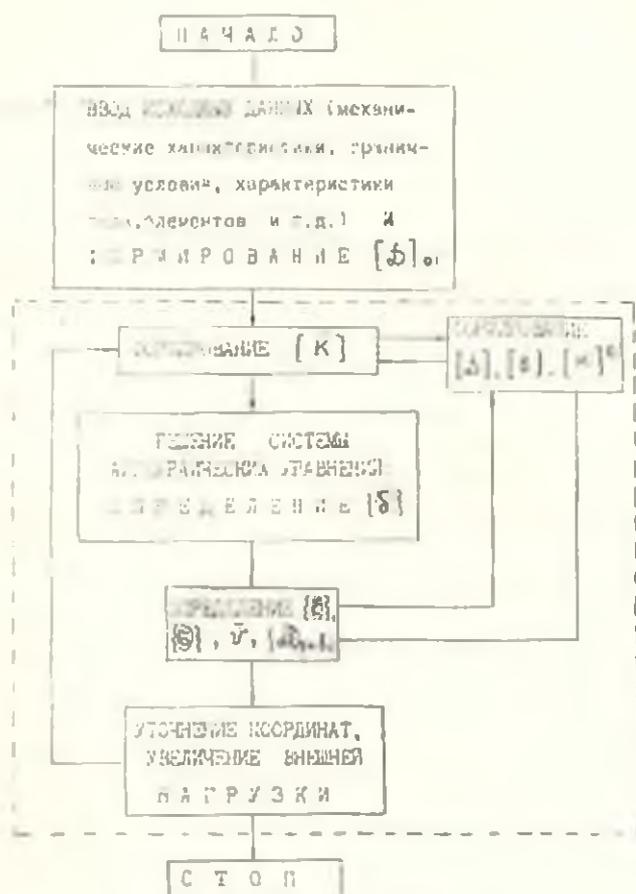


Рис. 1. Блок-схема вычислений.

Учет граничных условий осуществляется по методике [3]. При этом диагональный элемент k_{ii} матрицы жесткости всей конструкции умножается на заданное большое число $0,1 E + 9$, а соответствующая компонента вектора узлового усилия заменяется величиной $Ck_{ii} \cdot 0,1 E + 9$, где C — заданное перемещение этого узла. Поскольку другие члены данного уравнения остаются неизменными малыми величинами, по сравнению с двумя другими, то в полученном решении приращение перемещения соответствующего узла будет приближенно равняться величине C . Решение системы алгебраических уравнений позволяет получить также остальные приращения узловых перемещений сетки конечных элементов. Далее, при помощи матриц $[B]$ и $[D]$ определяются компоненты напряженно-деформированного состояния, после чего и устанавливается деформированная форма заготовки. При этом перемещение узлов сетки и компоненты деформаций конечных элементов опре-

деляются суммированием соответствующих приращений перемещений и деформаций.

Отличительной особенностью приведенного метода расчета является предварительная линеаризация нелинейных алгебраических уравнений методом переменных параметров упругости. При этом матрица жесткости $[k]$ в пределах каждого шага итерационного процесса принимается постоянной и составляется по результатам, полученным на предыдущем шаге. После достижения заданной точности расчета увеличивается внешняя нагрузка заготовки. Этот цикл повторяется до тех пор, пока степень деформирования заготовки не достигает заданной величины.

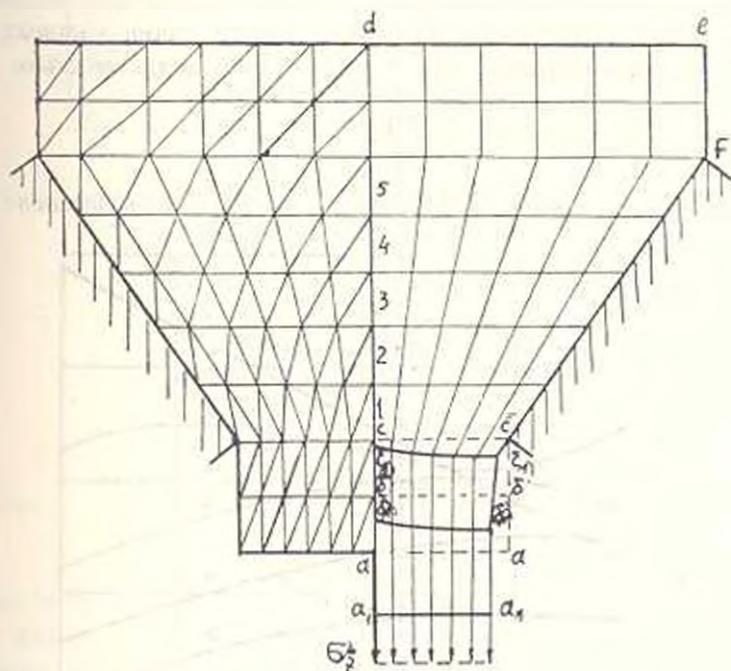


Рис. 2. Схема волочения пористой заготовки переменного сечения.

Для исследования процессов формирования пористых цилиндрических заготовок в конических матрицах на алгоритмическом языке ФОРТРАН-IV составлена вычислительная программа (часть этой программы, которая реализует формирование матрицы жесткости $[k]$ и граничные условия, приведены в конце статьи.) В программе используется общеизвестная подпрограмма решения системы алгебраических уравнений под названием SISN1. С помощью разработанной программы рассмотрен случай начального периода волочения пористой заготовки (рис. 2), когда сечение $a-a$ перемещается параллельно и занимает положение a_1-a_1 . Практическая ценность этой задачи заключается в теоретической оценке деформируемости при волочении прутков, содержащих микропоры и неметаллические включения (источники появления новых пор). Это подтверждается тем, что начальная микропо-

ристость заготовки, действительно, является причиной возникновения внутренних разрывов при волочении [4].

Вычисления выполнялись на ЭВМ ЕС-1022. Материал заготовки — спеченная медь из порошка марки ПМС-1 со следующими физико-механическими характеристиками: $A = 175 \text{ МПа}$; $B = 500 \text{ МПа}$; $b = 0,3$; $m = 0,85$; $n = 0,25$; $\mu = 0,48$; $\nu = 0,16$.

Граничные условия имеют вид:

а) безразмерные перемещения w , u узлов в осевом z и радиальном r направлениях (рис. 2) свободны, кроме узлов на оси заготовки ($u_{ad} = 0$), на поверхности заготовки, ограниченной радиусом ad ($w_{ad} = c$), и на конической части заготовки cF ($u_{cF} = w_{cF} \text{tg } \varphi$);

б) на конической части заготовки cF проекции узловых усилий Z_{cF} , R_{cF} по направлениям осей z и r связаны зависимостью:

$$R_{cF} = \frac{f \text{tg } \varphi - 1}{\text{tg } \varphi + f} Z_{cF},$$

где $\varphi = 30^\circ$ — угол конической матрицы; $f = 0,05$ — коэффициент трения.

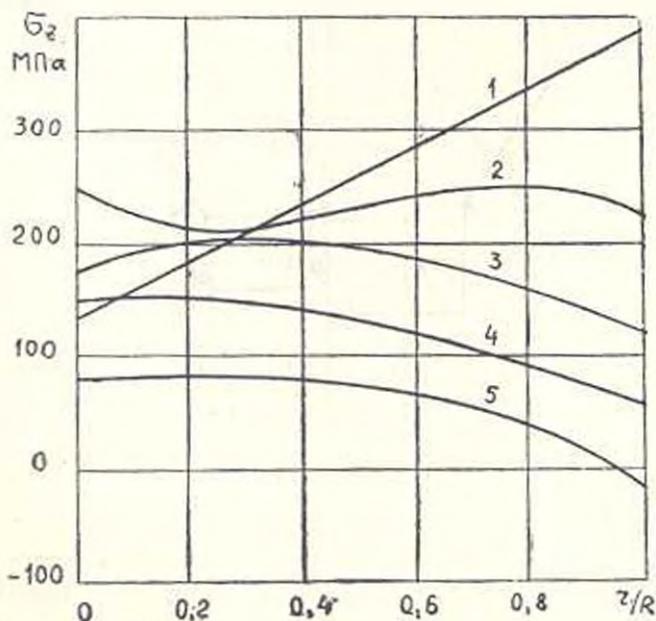


Рис. 3. Эпюры осевого напряжения σ_z для различных сечений.

Имеем также: $D_0/h = 1,14$; $D_0/D_a = 2,28$, где D_a — начальный диаметр заготовки; D_0 — диаметр изделия; h — высота конической части матрицы.

Исследования показали, что при максимальной пластической деформации, равной 9%, эпюры осевого напряжения σ_z , осредненного по двум смежным треугольным элементам, для различных сечений (1, 2, 3, 4, 5) конической части стержня имеют вид, приведенный на рис. 3. Как следует из рис. 2 и 3, большие перемещения и напряжения σ_z воз-

никают у выходных сечений заготовки. Следовательно, в этих сечениях будут большие пластические деформации и положительные средние напряжения. Схема распространения больших пластических деформаций при начальном течении волочения цилиндрических заготовок переменного сечения показана на рис. 4. Что касается пористости, то она в действительности увеличивается быстрее в выходных сечениях, и при срав-

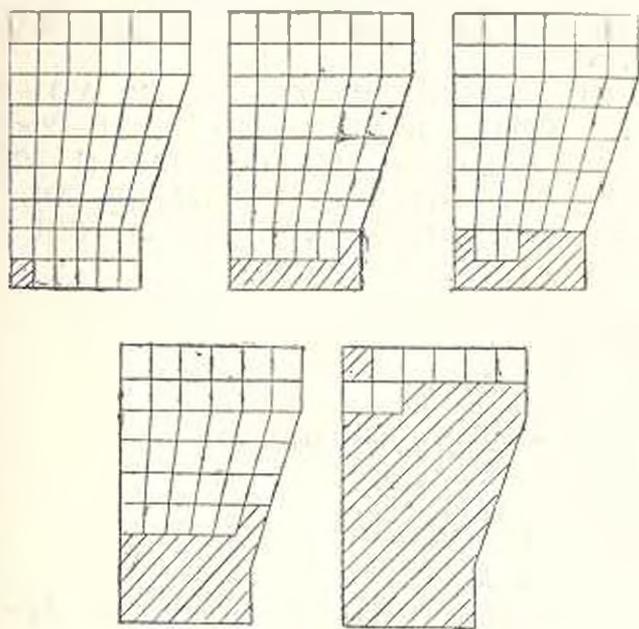


Рис. 4. Схема распространения больших пластических деформаций при волочении.

нительно большой начальной пористости и степени обжатия может привести к разрушению изделия [4]. Это объясняется тем, что увеличение пористости пропорционально положительному среднему напряжению и степени пластической деформации заготовки [1, 2].

Формирование матрицы жесткости $[k]$

```

DO 6 I = 1, L4
DO 6 J = 1, K
6 A(I, J) = 0.0
DO 7 I = 1, N1
DO 7 J = 1, M1
RI = R(I + 1, J + 1); RJ = R(I, J); RM = R(I, J + 1);
RZ = R(I + 1, J); ZI = Z(I + 1, J + 1); ZJ = Z(I, J);
ZM = Z(I, J + 1); ZR = Z(I + 1, J); IB = (I + 1) * M1 + J;
L1 = 2 * IB - 1
DO 7 IJ = 1, 2
CI(1) = RM - RJ; CI(2) = RI - RM; CI(3) = RJ - RI;

```

```

BI(1) = ZJ - ZM; BI(2) = ZM - ZI; BI(3) = ZI - ZJ;
DM = RJ * BI(2) + RI * BI(1) + RM * BI(3);
R1 = (RI + RJ + RM)/3.0; VS(L1) = PI * R1 * DM
DO 9 I2 = 1, 6, 2
L2 = I2/2 + 1; B(L1, 1, I2) = 0.0; B(L1, 1, I2 + 1) = C1(I2)/DM;
B(L1, 2, I2) = BI(L2)/DM; B(L1, 2, I2 + 1) = 0;
B(L1, 3, I2) = 1/(3 * R1); B(L1, 3, I2 + 1) = 0;
B(L1, 4, I2) = C1(I2)/DM; B(L1, 4, I2 + 1) = BI(L2)/DM
9 CONTINUE
RM = RJ; RJ = RZ; ZM = ZJ; ZJ = ZR; VO = VA(L1);
C = (G - AO)/(1 + AO); CO = (1 + C) * (1 - 2 * C);
COI = C/CO; D(4, 4) = (1 + AO)/3; CO = (1 - C)/CO;
D(1, 2) = COI; D(1, 3) = COI; D(2, 1) = COI;
D(3, 1) = COI; D(2, 3) = COI; D(3, 2) = COI
DO 5 I1 = 1, 3
D(I1, 4) = 0; D(I1, I1) = CO; D(4, I1) = 0.0
5 CONTINUE
DO 71 I1 = 1,4
DO 71 J1 = 1,4
71 DI(I1, I1, J1) = VE(L1) * D(I1, J1)
L1 = L1 + 1
7 CONTINUE
DO 10 I = 1, N
DO 10 J = 1, M
L = 2 * ((I - 1) * MI + J) - 1; L1 = 2 * ((I - 1) * M + J) - 1
DO 12 I1 = 1,6
MI(I1) = 0
DO 12 J1 = 1,6
DO 12 K1 = 1,6
12 AK(I1, J1, K1) = 0
MI(1) = L; MI(2) = L + 1
IF(1.EQ.1.OR.J.EQ.1) GO TO 141
MI(4) = L - 2 * MI - 1
MI(5) = L - 2 * MI - 2
141 IF(1.EQ.N.OR.J.EQ.1) GO TO 142
MI(3) = L - 2
142 IF(1.EQ.1.OR.J.EQ.M) GO TO 143
MI(6) = L - 2 * MI + 1
143 DO 15 I1 = 1,6
333 FORMAT (IX, 10II0)
L2 = MI(I1)
IF(L2.EQ.0) GO TO 15
DO 16 J1 = 1,6
DO 16 K1 = 1,4
BD1 = 0
DO 17 K2 = 1,4

```

```

17 BD1 = BD1 + B(L2, K2, J1) * D1(L2, K2, K1)
16 BD(J1, K1) = BD1
   DO 18 J1 = 1,6
   DO 18 K1 = 1,6
   BD1 = 0
   DO 19 K2 = 1,4
19 BD1 = BD1 + BD(J1, K2) * B(L2, K2, K1)
18 AK(I1, J1, K1) = BD1 * VS(L2)
15 CONTINUE
   A(L1, L1) = AK(1, 3, 3) + AK(2, 5, 5) + AK(3, 5, 5) +
   + AK(4, 1, 1) + AK(5, 1, 1) + * AK(6, 3, 3)
   A(L1, L1 + 1) = AK(1, 3, 4) + AK(2, 5, 6) + AK(3, 5, 6) +
   + AK(4, 1, 2) + AK(5, 1, 2) + * AK(6, 3, 4)
   A(L1 + 1, L1) = A(L1, L1 + 1)
   A(L1 + 1, L1 + 1) = AK(1, 4, 4) + AK(2, 6, 6) +
   + AK(3, 6, 6) + AK(4, 2, 2) + AK(5, 2, 2) + * AK(6, 4, 4)
   IF(I + 1.GT.N.OR.J + 1.GT.M) GO TO 20
   L2 = 2 * (I * M + J + 1) - 1;
   A(L1, L2) = AK(1, 3, 1) + AK(2, 5, 1);
   A(L1, L2 + 1) = AK(1, 3, 2) + AK(2, 5, 2);
   A(L1 + 1, L2) = AK(1, 4, 1) + AK(2, 6, 1);
   A(L1 + 1, L2 + 1) = AK(1, 4, 2) + AK(2, 6, 2);
   A(L2 + 1, L1 + 1) = A(L1 + 1, L2 + 1);
   A(L2, L1 + 1) = A(L1 + 1, L2); A(L2 + 1, L1) = A(L1, L2 + 1);
   A(L2, L1) = A(L1, L2)
20 IF(I + 1.GT.N) GO TO 21
   L2 = 2 * (I * M + J) - 1; A(L1, L2) = AK(2, 5, 3) + AK(3, 5, 1);
   A(L1, L2 + 1) = AK(2, 5, 4) + AK(3, 5, 2);
   A(L1 + 1, L2) = AK(2, 6, 3) + AK(3, 6, 1);
   A(L1 + 1, L2 + 1) = AK(2, 6, 4) + AK(3, 6, 2);
   A(L2 + 1, L1 + 1) = A(L1 + 1, L2 + 1);
   A(L2, L1 + 1) = A(L1, L2 + 1); A(L2 + 1, L1) = A(L1, L2 + 1);
   A(L2, L1) = (L1, L2)
21 IF(J + 1.GT.M) GO TO 10
   L2 = 2 * ((I - 1) * M + J + 1) - 1;
   A(L1, L2) = AK(6, 3, 1) + AK(1, 3, 5);
   A(L1, L2 + 1) = AK(6, 3, 2) + AK(1, 3, 6);
   A(L1 + 1, L2) = AK(6, 4, 1) + AK(1, 4, 5);
   A(L1 + 1, L2 + 1) = AK(6, 4, 2) + AK(1, 4, 6);
   A(L2 + 1, L1 + 1) = A(L1 + 1, L2 + 1);
   A(L2, L1 + 1) = A(L1 + 1, L2); A(L2 + 1, L1) = A(L1, L2 + 1);
   A(L2, L1) = A(L1, L2)
10 CONTINUE

```

Граничные условия

```

DO 25 I = 1, L4
25 U(I) = 0
SZ = -(1 - F * TA)/(TA + F)
DO 26 J = 1, M
L1 = 2 * J - 1; A(L1 + 1, L1 + 1) = SC * A(L1 + 1, L1 + 1)
L1 = 2 * (N - 1) * M + J) - 1; U(L1) = C2 * SC * A(L1, L1);
A(L1, L1) = SC * A(L1, L1);
    U(L1 + 1) = C1 * SC * A(L1 + 1, L1 + 1);
A(L1 + 1, L1 + 1) = SC * A(L1 + 1, L1 + 1)
26 CONTINUE
DO 27 I = 1, N
L1 = 2 * (M * (I - 1) + 1) - 1; U(L1) = C2 * SC * A(L1, L1);
A(L1, L1) = SC * A(L1, L1)
27 CONTINUE
DO 28 I = 1K, 1K1
L1 = 2 * I * M; A(L1 + 1, L1 - 1) = -SZ;
A(L1, L1 - 1) = -1.0; A(L1 - 1, L1 - 1) = 1; A(L1, L1 - 1) = -F
28 CONTINUE
310 FORMAT (1X, 12F10.4)
DO 117 I = 1, L4
117 K(I, K) = U(I)
CALL SISNI (L4, K, A, U)
DO 36 I = 1K, 1K1
L1 = 2 * I * M; TX(L1 - 1) = U(L1 - 1);
U(L1 - 1) = TA * U(L1)
36 CONTINUE

```

Էրվիլի ան. Կ. Մարքս

14. IV 1983

Գ. Լ. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ, Գ. Գ. ՆԵՐՍԻՍՅԱՆ

**ՎԵՐՋԱՎՈՐ ԷԼԵՄԵՆՏՆԵՐԻ ՄԵԹՈԴՈՎ ԿՈՆԱԿԱՆ ՄԱՏՐԻՑԱՅՈՒՄ
ՄԱԿՈՏԿԵՆ ՆՅՈՒԹԵՐԻ ԶԵՎԱՎՈՐՄԱՆ ՊՐԱՑԵՍՆԵՐԻ ՀԵՏԱԶՈՏՄԱՆ
ՄԻ ՀԱՇՎԻՉ ՄՐԱԳՐԻ ՄԱՍԻՆ**

Ա մ փ ո փ ո ս մ

Վերջավոր էլեմենտների մեթոդով ծակոտկեն գլանային պատրաստուկների կոնական մատրիցայում ձևավորման պրոցեսների հետազոտման համար մշակված է հաշվիչ ծրագիր, որը հնարավորություն է տալիս րատ պատրաստուկի յափերի և վերջավոր էլեմենտների քանակի իրականացնել նրա ավտոմատ բաժանումը օղակաձև եռանկյուն հատվածքով վերջավոր էլեմենտների:

Հետազոտված է կորզանման դեպքում ծակոտկեն պատրաստուկի յարվածա-դեֆորմացիոն վիճակը: Ցույց է տրված, որ նյութի սկզբնական միկրոծակոտկենությունը հանդիսանում է ձողերի քայքայման պատճառը:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. *Петросян Г. Л., Нерсесян Г. Г., Аветян С. С.* Исследование напряженно-деформированного состояния осесимметричной осадки пористых материалов МКЭ.— Изв. АН АрмССР, Механика, 1980, XXIII, № 1, с. 65—76
2. *Петросян Г. Л.* и др. Уплотнение пористых материалов в жестких конических и цилиндрических матрицах.— Порошковая металлургия, 1982, № 5, с. 22—27.
3. *Зенкевич О.* Метод конечных элементов в технике.— М.: Мир, 1975.— 541 с.
4. *Перлин И. Л., Ерманок М. З.* Теория волочения.— М.: Металлургия, 1971.— 448 с.