

УДК: 620.191.34 : 621.791.75

**ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО
СОСТОЯНИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ВЕРТИКАЛЬНЫХ
ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ РЕЗЕРВУАРОВ С ПОРАМИ.
ЧАСТЬ 1. ОБЩИЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД**

Коваленко В.В.

*Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа
e-mail: 9kova9@rambler.ru*

Ерофеев В.В., Богословский С.В.

Челябинский государственный агроинженерный университет, г. Челябинск

Аннотация. *В статье разработана методика для оценки несущей способности сварных соединений, в зависимости от степени нагружения соединения, месторасположения пор в пространстве и их геометрических размеров. Для практического использования разработанной методики при определении полей напряжений и деформаций сварных соединений с порами были построены соответствующие графики и номограммы.*

Ключевые слова: *вертикальный цилиндрический резервуар, напряженно-деформированное состояние, поверхностные раковины (поры), интенсивность деформаций и напряжений, интенсивность неупругих деформаций, ресурс пластичности*

При анализе причин преждевременного разрушения вертикальных цилиндрических резервуаров было установлено, что большое число отказов происходит из-за наличия пористости сварных швов, которая является одним из самых распространенных дефектом. При нагружении сварных соединений с порами вблизи их контура имеет место значительная концентрация напряжений, которая вызывает локальные пластические деформации, как правило, приводящие к исчерпанию ресурса пластичности металла вблизи пор и возникновению несплошностей в виде острых трещин.

Как правило, дефекты типа пор имеют правильную сферическую форму, поэтому данные о нормировании данных дефектов основаны на известных упругих решениях о распределении напряжений вблизи сферической полости [1].

Следует отметить, что точный анализ механического поведения сварных соединений с порами в условиях локальной и общей текучести связан со значительными трудностями, характерными для решения объемных упругопластических задач. В связи с этим большинство работ, связанных с исследованием напряженно - деформированного состояния сварных соединений с порами, базировались на использовании приближенных подходов для оценки неупругих деформаций и напряжений вблизи контура пор. Один из таких подходов был ранее изложен в работе [2]. Не останавливаясь на теоретическом анализе и выводе громоздких аналитических выражений, которые подробно изложены в рассматриваемой

работе, изложим сущность данного подхода и остановимся на полученных с его помощью результатах.

Оценка упругопластических напряжений и деформаций, приведенная в работе [2], основана на методе перемещений, в котором была использована однопараметрическая модель конструкции, ранее изложенная в работе [3]. В рамках данной модели при наличии единственной базисной функции ε_{ij}^B , анализ полей перемещений U_{ij} и деформаций производится посредством одного кинематического параметра U^B – обобщенного перемещения. В качестве базисной функции ε_{ij}^B было взято упругое распределение деформаций вблизи сферической полости, полученное на основе работы [1]. При этом $\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^B \cdot U^B$. Значение параметра нагружения сварного соединения с порами при вычислении базисной функции принимали единичным $\sigma_{cp}/2G=1$ (G – модуль упругости второго рода).

На основе энергетических принципов механики сплошных сред внутреннее и внешние силовые факторы в однопараметрической модели конструкции связаны следующим образом [1]:

$$\psi \sigma_{cp} = U^B \cdot W^B - D_p, \quad (1)$$

где $W^B = \int_V \sigma_{ij}^B \cdot \varepsilon_{ij}^B dV$ – внутренняя энергия сварного соединения на базисном поле деформаций ε_{ij}^B и напряжений σ_{ij}^B ; V – объем деформирования; $D_p = \int_V \sigma_{ij}^B \cdot \varepsilon_{ij}^n dV$ – пластическая диссипация энергии при девиаторе неупругих деформаций ε_{ij}^n ; ψ – работа единичных внешних сил (напряжений) на базисном перемещении U^B .

Таким образом решение задачи сводилось к определению составляющих уравнения (1). Параметры W^B и ψ определяли на основе упругого решения [1]. Для подсчета пластической диссипации энергии D_p при произвольной диаграмме деформирования использовали структурную модель упругопластической среды, предложенную в работе [2]. Согласно данной модели каждый элементарный объем металла можно представить набором подэлементов, наделенных своими уникальными идеально упругопластическими свойствами. Если диаграмму деформирования металла аппроксимировать некоторым количеством отрезков, характеризующих деформирование подэлементов, то для определения параметра D_p сварного соединения в целом, необходимо оценить данную величину для каждого из подэлементов и осреднить найденные значения с учетом характерной доли данных подэлементов.

Для определения обобщенного кинематического параметра U^B , уравнение (1) решали итерационным путем, используя при этом процедуру, известную как метод дополнительных напряжений [4]. Применительно к рассматриваемому случаю этот метод может быть интерпретирован следующим образом. На i -ой операции к значению U^B суммируется некоторое приращение ΔU^B , величина которого

определяет невязку уравнения (1) в упругой и упругопластической стадиях деформирования. Процесс итераций заканчивается, когда данная невязка с заданной погрешностью равна нулю.

Таким образом, были определены максимальные значения интенсивности неупругих деформаций $\varepsilon_{i\max}$ вблизи контура пор в зависимости от нагруженности сварных соединений, вида диаграммы деформирования металла сварных швов, геометрических размеров пор и места их расположения.

Как правило, для определения величины неупругих деформаций и напряжений используются приближенные способы, основанные на выявленных закономерностях перераспределения упругих напряжений и деформаций в пластических областях. Среди множества подходов наиболее известным является метод Нейбера [5], позволяющий связать интенсивность напряжений и деформаций ($\sigma_{i\max}$ и $\varepsilon_{i\max}$) в самой опасной точке конструкции при ее упругопластическом деформировании с соответствующими значениями интенсивности напряжений и деформаций в упругом теле ($\sigma_{i\max}^{уп}$ и $\varepsilon_{i\max}^{уп}$). В частности, из выражения

$$K_\varepsilon \cdot K_\sigma = \alpha_\sigma^2, \quad (2)$$

где: K_ε и K_σ – коэффициенты концентрации интенсивности деформаций и напряжений в пластической области; α_σ – коэффициент концентрации напряжений в упругой области, получаем

$$\sigma_{i\max} \cdot \varepsilon_{i\max} = \sigma_{i\max}^{уп} \cdot \varepsilon_{i\max}^{уп} = \text{const}. \quad (3)$$

То есть произведение интенсивностей деформаций и напряжений является величиной постоянной для рассматриваемого концентратора в упругом и упругопластическом теле.

Решая уравнение (3) с учетом представления диаграммы деформирования металла в виде (4)

$$\sigma_i = A\varepsilon_i^n, \quad (4)$$

можно получить соответствующие значения интенсивности неупругих деформаций вблизи контура пор. На рис. 1 показана процедура получения упругопластического решения (A1) по заранее известному упругому решению (точка A).

По сути задача сводится к нахождению некоторого приращения интенсивности деформаций $\Delta\varepsilon_i$, характеризующей положение точки A₁ путем введения некоторого корректировочного коэффициента ξ_n :

$$\Delta\varepsilon_i = \frac{\Delta\sigma_i}{2G\xi_n}, \quad (5)$$

где $\Delta\sigma_i = \sigma_{i\max}^{уп} - \sigma_{i\max}$; $\Delta\varepsilon_i = \varepsilon_{i\max}^{уп} - \varepsilon_{i\max}$.

В работе [6] было показано, для материалов с невысокой степенью деформационного упрочнения и для острых концентраторов напряжений формула Нейбера [5] дает завышенные значения местных напряжений и деформаций в упругопластической области. В связи с этим было предложено ввести в правую часть фор-

мулы Нейбера поправочную функцию $\xi_n(\alpha_B, \sigma_{cp}, \varepsilon_i)$, как множитель коэффициента α_σ . Значение данной поправочной функции в каждом конкретном случае находят численно или экспериментально. В рамках принятой однопараметрической модели получено следующее аналитическое выражение для определения параметра ξ_n :

$$\xi_n = \frac{\varepsilon_{i\max}^n \cdot W^B}{\varepsilon_{i\max} \cdot D_p} - 1, \quad (6)$$

где: $\varepsilon_{i\max}$, $\varepsilon_{i\max}^n$ – интенсивности полных и пластических деформаций в самой опасной точке сварного соединения.

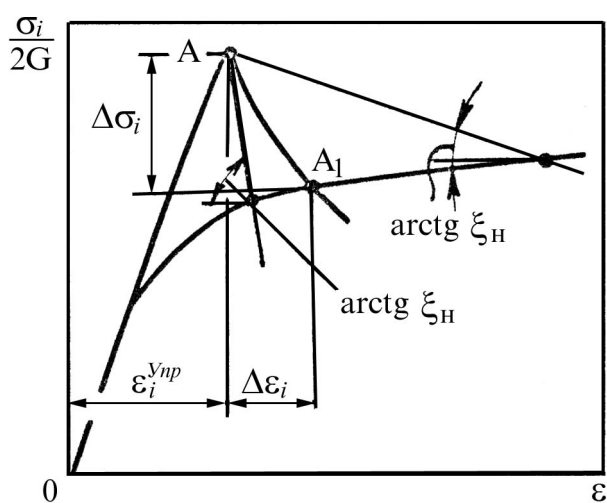


Рис. 1. Процедура получения упругопластического решения для сварного соединения с порами на основе известного упругого решения

В работе [2] приведены математические выражения для всех величин, входящих в формулу (6), что дает основание не показывать их в настоящей работе в силу их громоздкости. Ограничимся графической интерпретацией результатов вычислений в виде зависимости параметра ξ_n от нагруженности сварного соединения σ_{cp} , его геометрии и местоположения поры, представленной на рис. 2. Отметим, что последние два фактора характеризуются поправочной функцией F , которая находится путем сопоставления упругого решения для тел бесконечных и конечных размеров и для решений в упругой стадии работы при различных положениях поры в швах. При локальном пластическом деформировании металла в окрестности поры параметр ξ_n уменьшается с увеличением поправочной функции F . В условиях общей текучести (см. рис. 2б) влияние поправочной функции F на критические напряжения σ_{cp} незначительно.

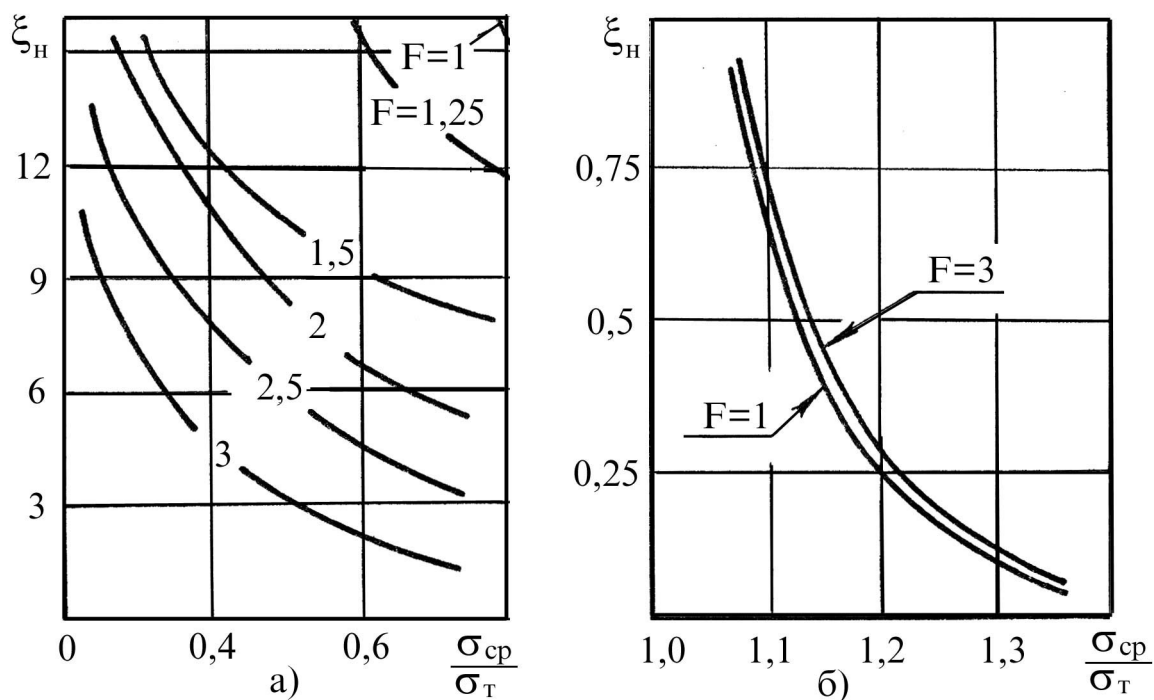


Рис. 2. Зависимости параметра ξ_H от нагруженности сварного соединения σ_{cp} , его геометрии и местоположения поры

Предложенный путь нахождения $\varepsilon_{i,max}$ представляет собой более гибкую методику, чем подход Нейбера. Данный путь учитывает остроту концентратора, нагруженность соединения, его форму, местоположение поры в пространстве и ее геометрические размеры.

В зависимости от степени нагруженности сварного соединения параметр ξ_H изменяется от 0 до ∞ , что отражает реальное поведение данного соединения. При использовании формулы Нейбера параметр ξ_H изменяется только от 0 до 1, что не всегда соответствует действительности (например, при небольшой области локальной текучести вблизи пор $\xi_H \gg 1$).

Для практического использования разработанной методики при определении полей напряжений и деформаций сварных соединений с порами были построены соответствующие графики и номограммы (рис. 3 и 4). В случае, когда реализуется локальное пластическое течение вблизи контура поры, зависимость максимальной интенсивности деформаций в самой опасной точке от относительной нагрузки σ_{cp}/σ_m приведена на рис. 3.

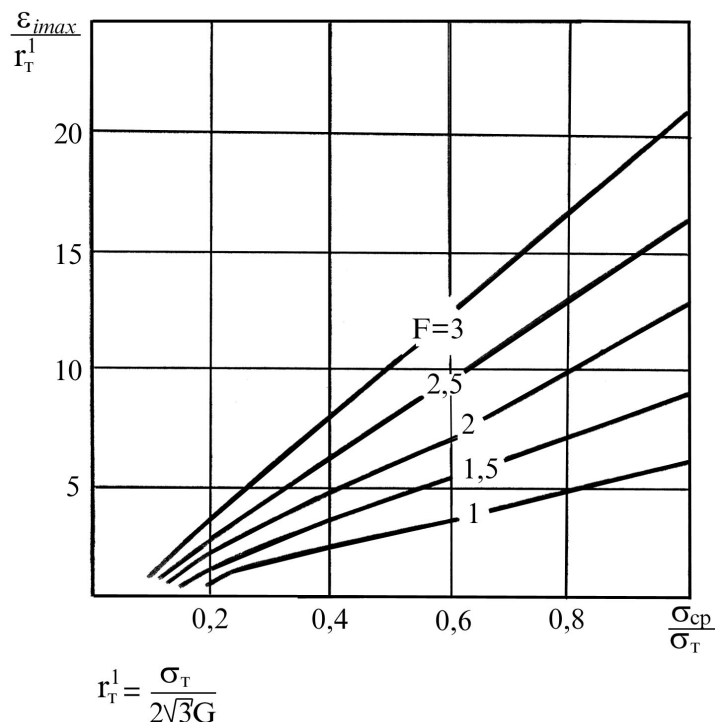


Рис. 3. Номограмма для определения статической прочности сварных соединений с порами

Нетрудно заметить, что максимальная деформация, отнесенная к параметру $r = \frac{\sigma_m}{2\sqrt{3}\omega}$ при различных значениях поправочной функции F практически линейна. Такую закономерность не представляется возможным оценить по методу Нейбера. Показатель упрочнения в данном случае не оказывает влияние на результаты вычислений.

Для определения максимальной интенсивности деформаций в условиях общей текучести предложена номограмма, представленная на рис. 4. В левой ее части приведена зависимость интенсивности деформаций $\varepsilon_i \left(\frac{2\sqrt{3}G}{\sigma_m} \right)$ от нагрузки для соединения бесконечных размеров при различной степени упрочнения металла n . В правой части – осуществляется переход к соединению конечных размеров, поры в которых занимают различное местоположение. Данный переход осуществляется за счет поправки F .

Для оценки несущей способности сварных соединений с порами в качестве критерия разрушения удобно использовать критическую деформацию (ресурс пластичности), которую находим из диаграмм пластичности в зависимости от показателя напряженного состояния [7]. Критическую нагрузку $\sigma_{ср}^{кр}$, соответству-

ющую появлению в соединениях микронесплошностей или надрывов на контуре пор определяем из следующих соотношений:

$$\varepsilon_i^{kp} = \varepsilon_{i \max}^{kp} = \omega(\sigma_{cp}^{kp}); \quad \varepsilon_i^{kp} = \frac{1}{\sqrt{3}} A_p(\Pi); \quad \sigma_{cp}^{kp} = \omega_o \left(\frac{A_p(\Pi)}{\sqrt{3}} \right), \quad (7)$$

где $\omega(\sigma_{cp}^{kp})$ – функция отражающая связь критической деформации $\varepsilon_{i \max}^{kp}$ с внешней нагрузкой σ_{cp}^{kp} ; $A_p(\Pi)$ – уравнение диаграммы пластичности; ω_o – функция обратная ω .

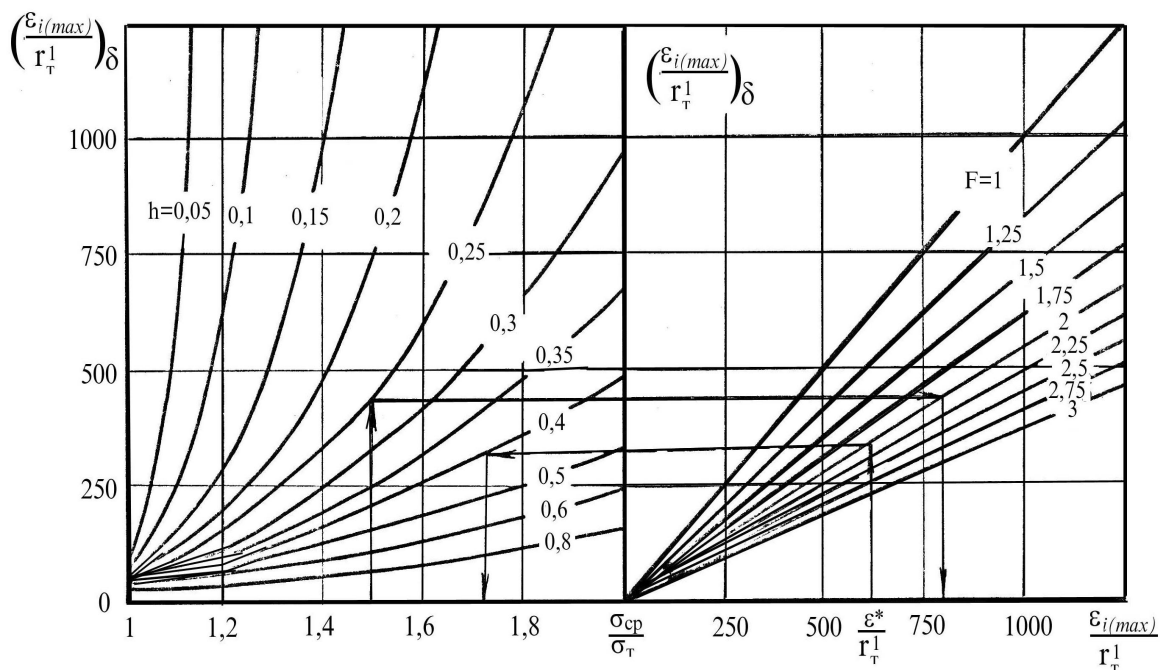


Рис. 4. Зависимость интенсивности деформаций $\varepsilon_i \left(\frac{2\sqrt{3}G}{\sigma_m} \right)$ при различной степени упрочнения металла и металла шва от местоположения пор

Логика определения текущей деформации в точке с максимальной интенсивностью напряжений в зависимости от степени нагружения соединения с порами, упрочняемости материала и поправочной функции F показана на номограмме стрелками (сплошные линии на рис.4). Оценка критических напряжений σ_{cp}^{kp} при которых произойдут локальные разрывы на контуре поры, представляет обратную задачу и логика ее решения показана на номограмме прерывистой линией. При этом для определения ε_i^{kp} применяют диаграммы пластичности конкретных материалов [7].

На основе полученного решения в работе было показано, что неоднородное напряженно-деформированное состояние от отдельных пор нивелируется на расстоянии примерно равным двум диаметрам наибольшей поры. Таким образом, разнесенные на большее расстояние поры можно считать изолированными и не влияющими друг на друга. Наиболее опасным из единичных дефектов будет пора, расположенная вблизи свободной поверхности сварного соединения (так как с приближением к последней поправка увеличивается). При развитой пористости, найденное по номограмме значение критического напряжения, необходимо умножить на параметр $T = 1 - \sum S_n / S$, где S_n – суммарная площадь пор в наиболее ослабленном сечении шва; S – площадь данного сечения.

Литература

1. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости. М.: Наука, 1979. 560 с.
2. Шахматов М.В., Богословский С.В. Влияние пор на несущую способность сварных соединений : сб. науч. тр. Челябинск: Челябинский политехнический ин-т, 1987. 25-37 с.
3. Гохфельд Д.А., Садаков О.С. Пластичность и ползучесть элементов конструкций при повторных нагружениях. М.: Машиностроение, 1984. 256 с.
4. Морозов Е.М., Никишков Г.П. Метод конечных элементов в механике разрушения. М.: Наука, 1980. 254 с.
5. Neuber H. Theory of stress concentration for shear-strained prismatical bodies with arbitrary nonlinear stress-strain law // J. Appl. Mech. December 1961. Volume 28. Issue 4. PP. 544 - 550. <http://dx.doi.org/10.1115/1.3641780>
6. Махутов Н.А. Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность. М.: Машиностроение, 1973. 200 с.
7. Колмогоров В.Л. Напряжения, деформации, разрушение. М.: Metallurgia, 1970. 230 с.

**INVESTIGATION OF STRESS-STRAIN STATE
OF WELD JOINTS OF VERTICAL CYLINDRICAL TANKS WITH PORES.
PART 1. GENERAL THEORETICAL APPROACH**

V.V. Kovalenko

*Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia
e-mail: 9kova9@rambler.ru*

V.V. Erofeev, S.V. Bogoslovskiy

Chelyabinsk State Agroengineering University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. *This paper developed a methodology for estimating the bearing capacity of welded joints, depending on the degree of loading of the connection, then the location in space and their geometric dimensions. For practical use of the developed technique for determining the stress and strain fields of welded joints with pores were constructed corresponding graphs and nomograms.*

Keywords: *vertical cylindrical tank, stress-strain state, surface sinks (pores), the intensity of the stresses and strains, the intensity of the inelastic deformation, plasticity resource*

References

1. Timoshenko S.P., Gud'er Dzh. Teoriya uprugosti (Theory of elasticity). Moscow, Nauka, 1979. 560 p.
2. Shakhmatov M.V., Bogoslovskii. S.V. Vliyanie por na nesushchuyu sposobnost' svarnykh soedinenii (Effect of pores on the carrying capacity of welded joints). Collection of scientific papers. Chelyabinsk, Chelyabinsk Polytech. Inst, 1987. pp. 25 - 37.
3. Gokhfel'd D.A., Sadakov O.S. Plastichnost' i polzuchest' elementov konstrukt-sii pri povtornykh nagruzheniyakh (Plasticity and creep of structural elements under repeated loading). Moscow, Mashinostroenie, 1984. 256 p.
4. Morozov E.M., Nikishkov G.P. Metod konechnykh elementov v mekhanike razrusheniya (The finite element method in fracture mechanics). Moscow, Nauka, 1980. 254 p.
5. Neuber H. Theory of stress concentration for shear-strained prismatical bodies with arbitrary nonlinear stress-strain law, J. Appl. Mech., December 1961, Vol. 28, Issue 4, pp. 544 - 550. <http://dx.doi.org/10.1115/1.3641780>
6. Makhutov N.A. Deformatsionnye kriterii razrusheniya i raschet elementov konstrukt-sii na prochnost' (Deformation fracture criteria and strength analysis of structural elements). Moscow, Mashinostroenie, 1973. 200 p.
7. Kolmogorov V.L. Napryazheniya, deformatsii, razrushenie (Stresses, strains, fracture). Moscow, Metallurgiya, 1970. 230 p.