

УДК 620.179.14

**КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ТЕРМООБРАБОТКИ СТАЛИ 50ХГФА
ИМПУЛЬСНЫМ МАГНИТНЫМ МЕТОДОМ****В.Ф. МАТЮК, М.А. МЕЛЬГУЙ, А.Л. ЛЮБАРЕЦ, А.А. ОСИПОВ**
(Институт прикладной физики НАН Беларуси, Минск)

Исследованы механические и магнитные свойства рессорно-пружинной стали 50ХГФА при различных режимах температуры закалки и отпуска. Показана невозможность контроля качества термообработки этой стали ни по одной из стандартных магнитных характеристик. Предложено осуществлять контроль ее механических свойств после закалки и высокотемпературного отпуска посредством измерения амплитуды импульсов, приводящих намагниченное изделие в размагниченное состояние или по градиенту поля остаточной намагниченности после импульсного намагничивания до насыщения и перемагничивания импульсами магнитного поля постоянной амплитуды.

Введение. Физической основой импульсного магнитного контроля механических свойств сталей является корреляционная связь между контролируемыми механическими свойствами изделий и измеряемыми магнитными параметрами. Сущность метода заключается в намагничивании изделия серией импульсов аксиально-симметричного магнитного поля и измерении градиента ∇H , нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности [1].

Однозначная связь между ∇H и механическими свойствами существует для низкоуглеродистых сталей после холодной прокатки и отжига, а также для ряда углеродистых легированных марок сталей после закалки и низкотемпературного отпуска. Контроль качества высокотемпературного отпуска закаленных сталей с содержанием углерода более 0,3 %, как правило, затруднен из-за неоднозначной зависимости стандартных магнитных характеристик от температуры отпуска [1 – 3], а следовательно, и от механических свойств этих сталей.

Хромомарганцеванадиевая сталь 50ХГФА используется для изготовления ответственных пружин и рессор, подвергающихся в процессе работы многократным переменным нагрузкам и требующих длительного цикла работы, отличается хорошей прокаливаемостью.

Целью настоящей работы является исследование магнитных характеристик рессорно-пружинной стали 50ХГФА и поиск магнитного параметра, по которому можно было бы определять механические свойства этой стали после закалки и высокотемпературного отпуска.

Методика исследования. Исследовались образцы в виде пластин размерами 140x20x2,2 мм³, подвергнутые закалке при пяти различных температурах в интервале 790...910 °С и отпуску при температурах в интервале 200...600 °С.

На каждом образце измерялась твердость по Роквеллу *HRC*. Испытание прочностных свойств цилиндрических образцов с пятикратным отношением расчетной длины к диаметру по ГОСТ 1497-84 осуществлено на универсальной испытательной машине ZD10/90.

Измерения магнитных свойств образцов в открытой магнитной цепи в квазистатическом режиме намагничивания и перемагничивания проводили с помощью магнитоизмерительного комплекса (МИК) [4], позволяющего получать основную кривую намагничивания и петлю гистерезиса по намагниченности, а также автоматически измерять основные стандартные магнитные характеристики образцов.

Напряженность намагничивающего и перемагничивающего полей изменяли во времени по пилообразному закону с частотой 0,1 Гц (полный цикл перемагничивания по петле гистерезиса - 10 с). Амплитудное значение поля составляло 20000 А/м.

Измеряли следующие магнитные характеристики образца: коэрцитивную силу по намагниченности $H_{см}$, максимальную намагниченность M_m , остаточную намагниченность M_r , намагниченность M_c по основной кривой $M(H)$ при $H = H_{см}$, начальную восприимчивость χ_n образца по основной кривой намагничивания и дифференциальную восприимчивость χ_{dm} по петле гистерезиса образца (при $H = H_{см}$).

Испытания магнитных свойств образцов в импульсном режиме проведены с помощью лабораторной установки, позволяющей осуществлять намагничивание и перемагничивание импульсным полем накладного соленоида, ось которого перпендикулярна поверхности испытуемого образца и проходит через центр его симметрии. Размеры соленоида: внутренний радиус – 5 мм; внешний радиус – 25 мм; длина – 30 мм. Максимальная амплитуда импульса напряженности магнитного поля на торце соленоида и его оси $(1,2 \pm 0,18) \cdot 10^6$ А/м. Пределы регулирования амплитуды импульсов магнитного поля от минус $1,2 \cdot 10^6$ А/м до плюс $1,2 \cdot 10^6$ А/м с шагом $1,9 \cdot 10^4$ А/м. Длительность импульсов по уровню 0,1 составляла 3,5 мс.

Величину градиента поля остаточной намагниченности измеряли феррозондом-градиентометром длиной 30 мм, полуэлементы которого расположены вдоль оси намагничивающего соленоида.

Результаты исследования и их обсуждение. Результаты исследования влияния режима термообработки на механические свойства стали 50ХГФА представлены на рис. 1.

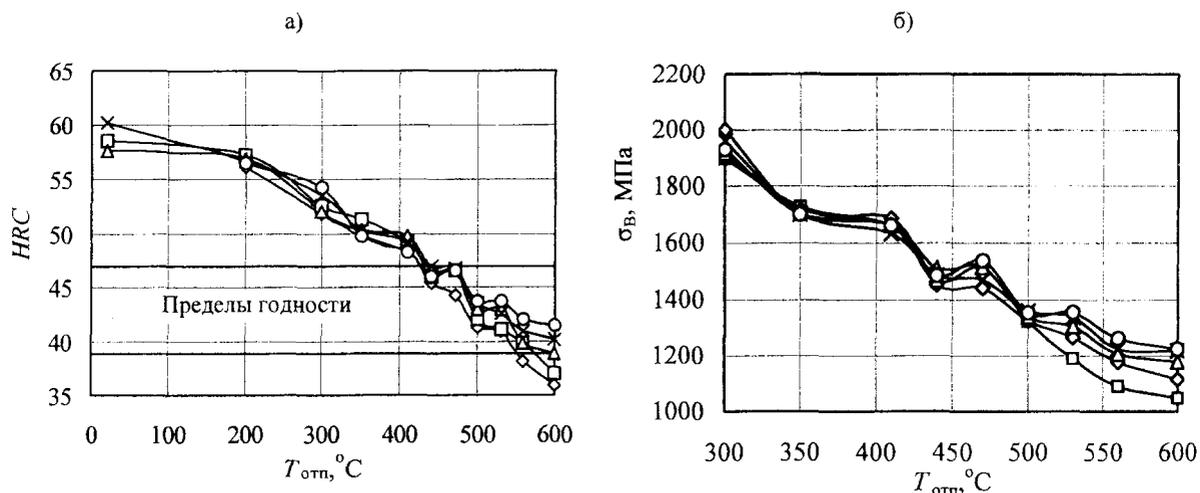


Рис. 1. Влияние температуры отпуска на механические свойства стали 50ХГФА, закаленной от различных температур в масле (а – твердость, б – прочность); температура закалки, °С: \diamond – 790; \square – 820; Δ – 850; \times – 880, \circ – 910

При увеличении температуры отпуска от 20 (без отпуска) до 600 °С твердость непрерывно уменьшается (рис. 1, а). В интервале температур отпуска 200...440 °С температура закалки слабо влияет на результат измерения твердости после отпуска, а в интервале 470...600 °С твердость тем меньше, чем меньше температура закалки, и при температуре отпуска 600 °С разность между твердостью образцов, закаленных от температур 790...910 °С, достигает 5 HRC. По требованиям СТБ 1274-2001 твердость рессор должна быть в интервале от 363 до 444 HB, что соответствует твердости по Роквеллу примерно 39...47 HRC.

Предел прочности (временное сопротивление разрыву) σ_b (рис. 1, б) в интервале температур отпуска 300...600 °С также убывает с увеличением температуры отпуска, а влияние температуры закалки на σ_b после отпуска при заданной температуре существенно в интервале 530...600 °С. Образцы без отпуска и отпущенные при 200 °С претерпевали хрупкое разрушение при относительном удлинении δ_5 и сужении ψ , равных нулю или близких к нулю, поэтому величина временного сопротивления разрыву была величиной случайной и на рис. 1, б не показана.

Следует отметить, что между твердостью HRC, пределом прочности σ_b , относительным удлинением δ_5 и относительным сужением ψ стали 50ХГФА в интервале температур отпуска 350...600 °С существует однозначная связь.

Результаты исследования магнитных свойств образцов в квазистатическом режиме намагничивания и перемагничивания представлены на рис. 2.

Из рисунка видно, что ни одна из стандартных магнитных характеристик не может служить параметром контроля твердости и прочности стали 50ХГФА в интервале температур отпуска от 300 до 600 °С, так как ни одна из них не изменяется столь же существенно и однозначно, как изменяется ее твердость в этом интервале.

Такие изменения магнитных и механических характеристик в зависимости от температуры отпуска обусловлены тем, что при температурах отпуска выше 300 °С происходит интенсивная коагуляция цементита и рост размера цементитных частиц [5], возрастает подвижность легирующих элементов, образующих с железом твердые растворы замещения, возникают специальные карбиды, уменьшается количество мелких и увеличивается количество крупных карбидных частиц, образуются равноосные мелкие зерна феррита, на порядок снижается плотность дислокаций. При этом твердость и прочность с увеличением температуры отпуска постоянно снижаются, в то же время на магнитные свойства указанные структурные изменения влияют противоречиво.

Так, коагуляция карбидов приводит к росту локальных напряжений вокруг включений, затрудняя процессы смещения доменных границ, и соответственно к росту коэрцитивной силы, а уменьшение искажений решетки феррита приводит к ее уменьшению. В результате суммарная зависимость коэрцитивной силы и других магнитных свойств оказывается неоднозначной.

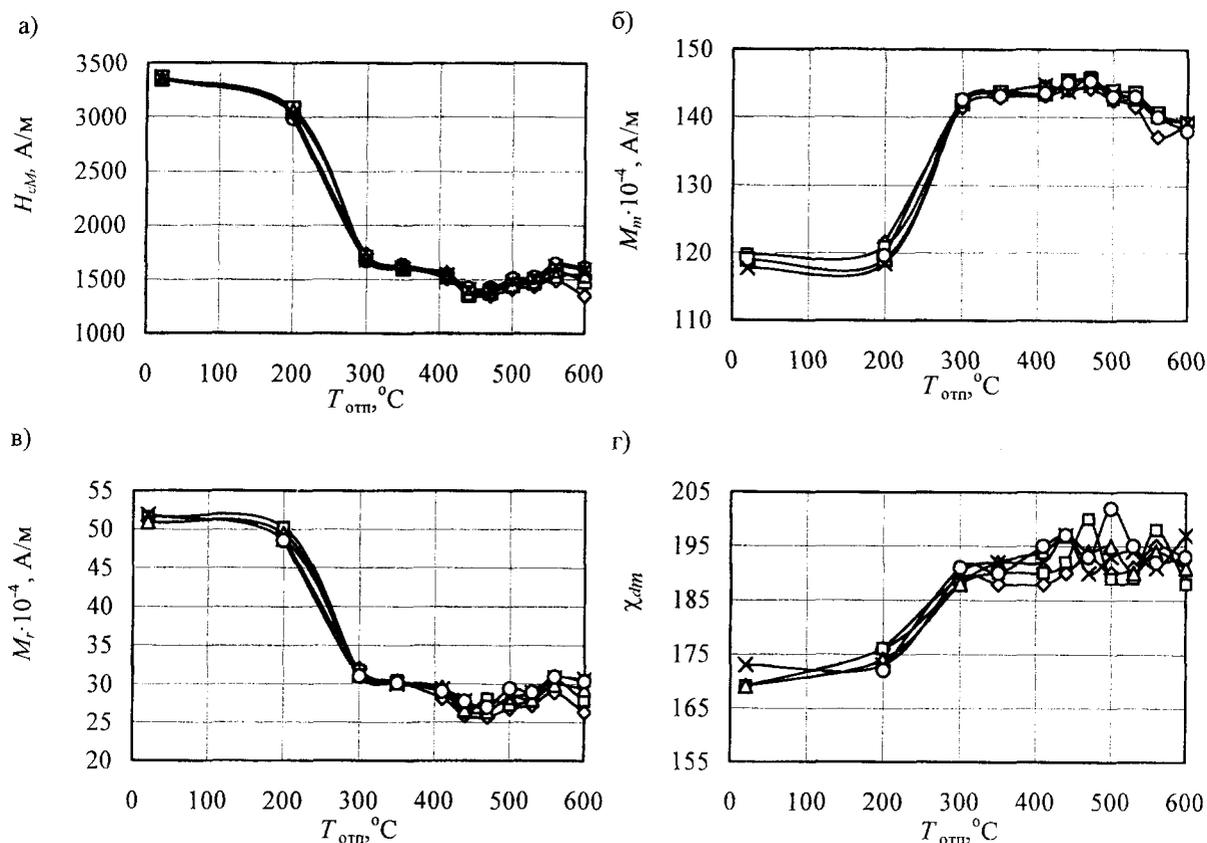


Рис. 2. Влияние температуры отпуска на магнитные свойства стали 50ХГФА, закаленной от разных температур в масле; температура закалки, °С: \diamond – 790, \square – 820, \triangle – 850, \times – 880, \circ – 910

Исследование образцов в импульсном режиме показывает (рис. 3), что намагничивание серий однополярных импульсов амплитудой $0,86 \cdot 10^6$ А/м приводит к зависимости градиента напряженности поля остаточной намагниченности ∇H_r от температуры отпуска (рис. 3, а) в интервале 20 (без отпуска) – 600 °С, аналогичной зависимости H_{cm} от температуры отпуска (см. рис. 2, а), что и следовало ожидать, так как при большом размагничивающем факторе N остаточная намагниченность пропорциональна коэрцитивной силе.

На рис. 3, б показаны кривые размагничивания закаленных от температуры 850 °С и отпущенных при разных температурах образцов под воздействием постепенно возрастающих по амплитуде импульсов противоположного направления H_p . Из них видно, что можно выбрать такую амплитуду размагничивающих импульсов, которая приведет к величине градиента поля остаточной намагниченности, равной нулю. Мы назвали эту величину релаксационной коэрцитивной силой в импульсном режиме H_{cr}'' . Ее величину можно определить по точке пересечения кривой размагничивания с осью H_p .

Ход зависимости H_{cr}'' от температуры отпуска показан на рис. 3, в. Из представленной зависимости следует, что во всем интервале 20 (без отпуска) – 650 °С существует однозначная зависимость H_{cr}'' от $T_{отп}$, что предопределяет возможность контроля твердости и прочности закаленной и отпущенной стали 50ХГФА по величине измеренной H_{cr}'' .

Однако методика измерения H_{cr}'' сложна в практической реализации. Поэтому нами испытана и известная [6] методика выбора оптимального режима перемагничивания всех образцов, закаленных от 850 °С и отпущенных при разных температурах, импульсным магнитным полем с одной и той же амплитудой импульсов, обеспечивающей однозначную зависимость градиента напряженности поля остаточной намагниченности от температуры отпуска.

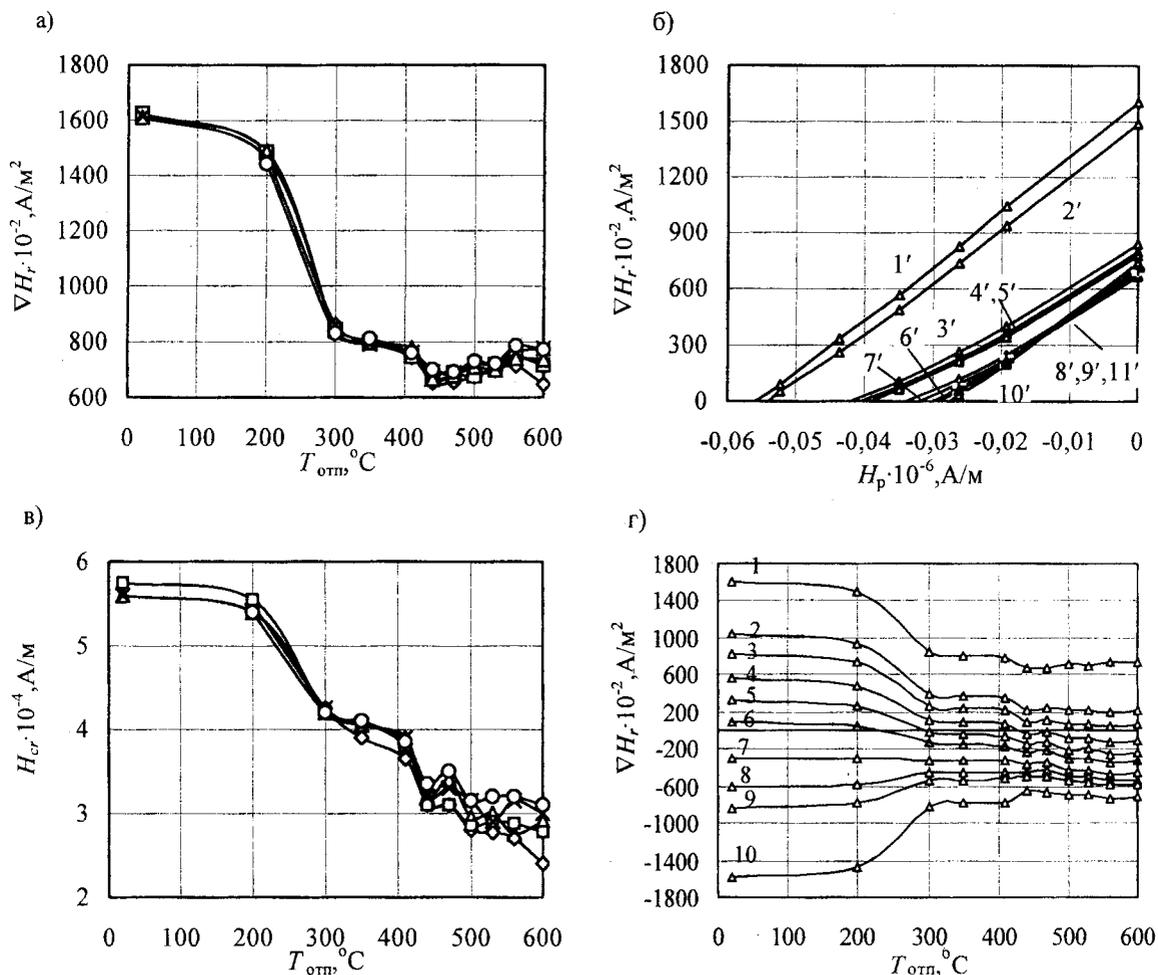


Рис. 3. Градиент ∇H_r , напряженности поля остаточной намагниченности образцов стали 50XГФА, закаленных от различных температур при намагничивании импульсами амплитудой $H_n = 0,86 \cdot 10^6$ А/м и перемагничивании импульсами амплитудой H_p :

- а) $H_p = 0$; б) $-6 \cdot 10^4 < H_p < 0$; в) H_p – до достижения $\nabla H_r = 0$;
- г) $H_p \cdot 10^{-4}$ А/м = const = 1 – 0; 2 – 1,93; 3 – 2,62; 4 – 3,49;
- 5 – 4,36; 6 – 5,23; 7 – 6,97; 8 – 8,71; 9 – 10,46; 10 – 86.

Температура закалки, °С: \diamond – 790, \square – 820, \triangle – 850, \times – 880, \circ – 910.

Температура отпуска, °С: 1' – 20; 2' – 200; 3' – 300; 4' – 350; 5' – 410; 6' – 440; 7' – 470; 8' – 500; 9' – 530; 10' – 560; 11' – 600

Как следует из рис. 3, г, существует такая амплитуда размагничивающего импульса (рис. 3, г, кривая 5), при которой имеет место однозначная связь между ∇H_r и температурой отпуска. Эта амплитуда $H_p = 4,36 \cdot 10^4$ А/м и примерно соответствует амплитуде, необходимой для размагничивания до $\nabla H_r = 0$ образца, отпущенного при температуре 300 °С.

При указанной амплитуде намагничивающих ($H_n = 0,86 \cdot 10^6$ А/м) и перемагничивающих ($H_p = 4,36 \cdot 10^4$ А/м) импульсов определено значение ∇H_r для всех образцов, закаленных от 790 до 910 °С и отпущенных в интервале 350...600 °С.

Из рис. 4 следует, что между ∇H_r , HRC, σ_b существует однозначная связь, т.е. по величине ∇H_r можно определять HRC, σ_b .

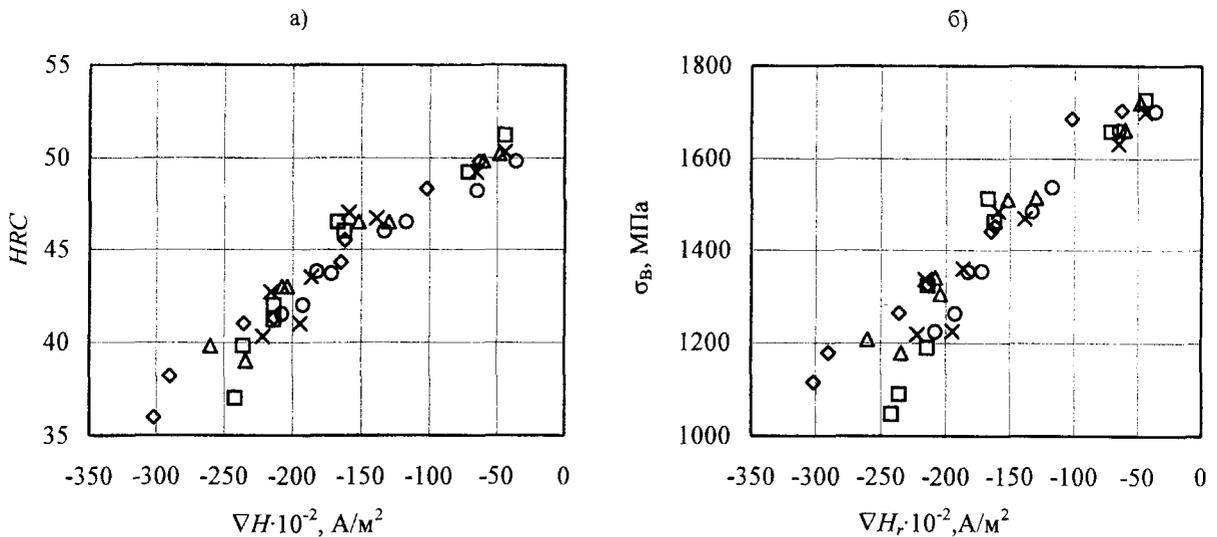


Рис. 4. Связь между ∇H_r и механическими свойствами стали 50ХГФА, закаленной от температур 790 – 910 °С и отпущенной в интервале температур 350 – 600 °С:
 а – твердость; б – прочность $H_n = 0,86 \cdot 10^6$ А/м, $H_p = 4,36 \cdot 10^4$ А/м.
 Температура закалки, °С: \diamond – 790; \square – 820; \triangle – 850; \times – 880, \circ – 910

Выводы

1. Контроль твердости листов рессор из стали 50ХГФА возможен по релаксационной коэрцитивной силе H_{cr}'' в импульсном режиме намагничивания и перемагничивания изделий или по градиенту поля остаточной намагниченности ∇H_r после импульсного намагничивания до насыщения и перемагничивания оптимальной амплитудой импульса в интервале температур отпуска 20...550 °С.
2. Контроль временного сопротивления разрыву σ_b возможен по тем же параметрам, только в интервале температур отпуска 350...550 °С, так как при испытаниях образцов, отпущенных при температурах до 300 °С, происходит их хрупкое разрушение.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мельгуй М.А. Магнитный контроль механических свойств сталей. - Мн.: Наука и техника, 1980. - 184 с.
2. Михеев М.Н., Горкунов Э.С. Магнитные методы структурного анализа и неразрушающего контроля. -М.: Наука, 1993.-252 с.
3. Вида Г.В., Ничишурок А.П., Царькова Г.П. Магнитные свойства сталей после закалки и отпуска // Дефектоскопия. - 2001. - № 2. - С. 3 - 56.
4. Мельгуй М.А., Осипов А.А. Установка для измерения динамических и квазистатических магнитных характеристик // Дефектоскопия. - 1991. - № 3. - С. 34 - 39.
5. Металловедение и термическая обработка стали; Справочник: В 3-х т. - изд. 3-е. Т. II: Основы термической обработки / Под ред. М.Л. Бернштейна, Г.М. Рахштадта. - М.: Металлургия, 1983. - 368 с.
6. Мельгуй М.А., Кратиров В.Б. Контроль закалки и отпуска некоторых углеродистых и легированных конструкционных сталей. - В кн.: Доклады VIII Всесоюзной науч.-техн. конф. по неразрушающим физическим методам и средствам контроля. Ч. II. -Кишинев, 1977. - С. 198-201.