



Energietechnik Essen

GmbH · seit 1811



Содержание

Contents

- | | |
|---|---|
| 1. Функция колпачковых колец и требования к этим конструктивным элементам | 1. The function of retaining rings and the requirements for these construction pieces |
| 2. Разработка колпачковых колец | 2. The development of retaining rings |
| 3. Технологический маршрут производства ненамагничиваемых колпачковых колец | 3. Production procedure for non- magnetizable retaining rings |
| 4. Свойства материалов P900 (номер материала 1.3816) Ненамагничиваемая, коррозионностойкая сталь для колпачковых колец
- химический состав
- физические параметры материала
- механические и технологические параметры материала | 4. Material properties P900 (ASTM A 289 class C) non-magnetizable, corrosion resistant retaining ring steel
- chemical composition
- physical properties
- mechanical and engineering properties |

Рисунок 1

Тело ротора с запресованным колпачковым кольцом и колпачковой плитой

Picture 1

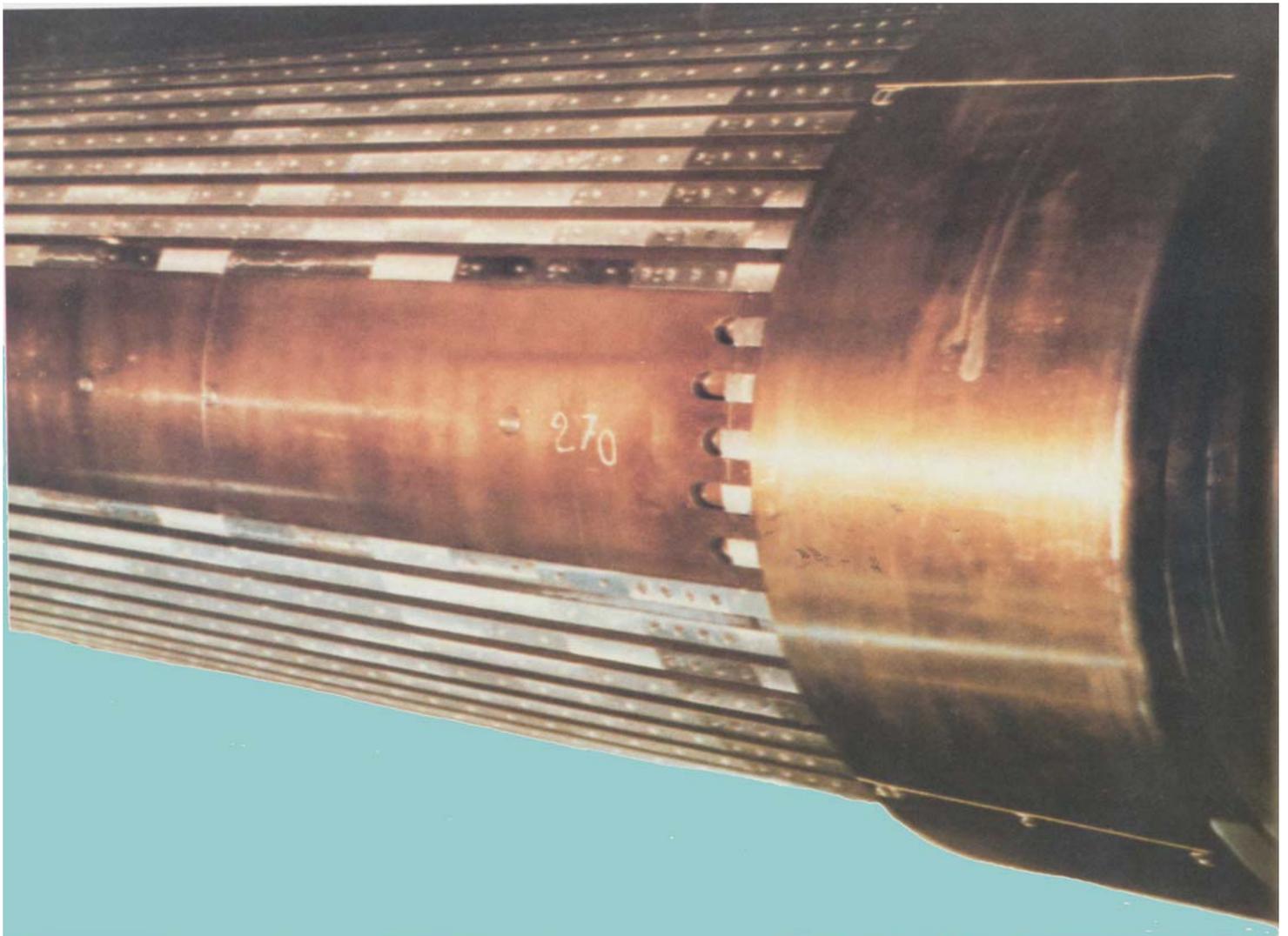
Generator rotor with shrunk-on Retaining ring and shrunk-in End plate.

Функция КОЛПАЧКОВЫХ КОЛЕЦ И ТРЕБОВАНИЯ К ЭТИМ КОНСТРУКТИВНЫМ ЭЛЕМЕНТАМ

Электрическая энергия производится сегодня почти исключительно во вращающихся машинах, так называемых генераторах. Текущие исследовательские работы по прямому производству тока, как например из солнечной энергии или другие способы непосредственного превращения энергии, не имеют ещё на сегодняшний день большого технического значения.

The function of retaining rings and the demands placed on them

Electric power is today almost exclusively produced by means of generators with rotating armatures. On-going research activities focusing on direct power generation, e.g. from solar energy or other direct conversion processes have not yet attained any big technical significance.



Большая часть производимого в генераторах тока приходится на ток из турбогенераторов. Они вращаются, в отличие от четырёхполюсных гидротурбинных генераторов, в двухполюсном исполнении со скоростью 3000 оборотов в минуту для производства переменного тока частотой 50 Гц. Для переменного тока частотой 60 Гц необходима скорость вращения 3600 оборотов в минуту. Четырёхполюсные машины вращаются по сравнению с двухполюсными с половиной числа оборотов, то есть 1500 или 1800 оборотов в минуту.

Вращающееся магнитное поле производится за счёт обмоток с переменной полярностью, которые возбуждаются постоянным током. Обмотки выступают из продольных пазов ротора на концах бочки и образуют головку обмотки, которая должна быть защищена от центробежной силы. Эти функции берут на себя колпачковые кольца. Они являются самыми высоконагруженными элементами турбогенератора.

Колпачковые кольца в большинстве случаев односторонне запрессованы на концах бочки ротора и защищены от вращательных и осевых движений по типу штыкового затвора. На обратной стороне бочки во многих случаях всажено в колпачковое кольцо опорное кольцо, которое принимает на себя в продольном направлении действующие силы головок обмотки.

При конструировании колпачковых колец нужно стремиться к оптимальному соотношению между прочностью и толщиной стенки, так как во время эксплуатации наряду с центробежными силами головок обмотки также должны быть приняты собственные центробежные силы колпачковых колец, которые могут достигать 50 % действующих сил. Эти силы составляют, например при центробежной скорости вращения в 1320 оборотов для четырёхполюсной MVA-машины, 135 MN. При номинальном числе оборотов колпачковые кольца нагружаются при центробежном испытании до 65 %, а при опробовании генератора до 80 % предела текучести 0,2.

By far the greater proportion of electric power supplied by generators comes from turbogenerators. In contrast to multi-pole water turbine-driven generators, two-pole turbogenerators operate at a speed of 3000 rpm when alternating current of 50 Hz is generated. For alternating current of 60 Hz a speed of 3600 rpm is required. Four-pole machines operate at half the speed of two-pole machines, i.e. 1500 resp. 1800 rpm.

The rotating magnetic field is produced by coils of alternating polarity held in longitudinal slots in the generator rotor body and through which a direct current flows. At the point where they leave the slots at the rotor ends, these coils form coil heads which must be secured against the centrifugal forces. This is the function of retaining rings, the most highly stressed components of a turbogenerator.

The retaining rings are usually fixed on the rotor body end by shrink to fit and secured against rotational and axial movement by, for example, a kind of bayonet lock.

A backing ring is often shrunk into the retaining ring on the side facing away from the rotor body to absorb the axial forces of the coil heads.

In designing retaining rings the aim must be to achieve an optimal relationship between strength and wall thickness as the operational forces include, in addition to the centrifugal forces acting on the coil heads, the centrifugal forces of the retaining rings themselves which can amount to as much as 50 % of the total forces acting. For example, in a four-pole 1320 MVA ($\approx 1.770.000 \text{ ehp}$) machine these forces amount to 135 MN ($\approx 30.000 \text{ kip}$) at test speed.

When the machine is operating at rated speed, the retaining rings are loaded at up to 65 % of their 0,2 % proof stress and during overspeed testing up to 80 %.

В то время как диаметр колпачковых колец зависит прежде всего от вида исполнения (двух- или четырёхполюсный) и мощности генератора, то длина колпачковых колец определяется конструкцией головок обмотки. Кольца для охлаждаемых водой роторов более длинные.

Разработка больших единиц мощности ведёт к растущей нагрузке на колпачковые кольца. Поэтому к этим кольцам и также к технологии их производства предъявляются самые высокие требования. Материал, из которого изготавливаются колпачковые кольца, должен выполнять следующие требования:

- высокий предел текучести 0,2
- достаточные свойства для холодной и горячей обработки
- не очень маленький коэффициент теплового расширения
- в большинстве случаев немагнитиваемость

Три названные первыми свойства выбраны в соответствии с конструкцией тела ротора и монтажной возможностью. Причина требования немагнитиваемости заключается в том, что ферромагнитные материалы при прохождении электрического поля создают вихревые токи, которые приводят к потере мощности и к дополнительной нагрузке уже и без того сложной системы охлаждения генератора. Нагрев намагничиваемого колпачкового кольца во время эксплуатации не должен подвергать опасности как место посадки кольца, так и изоляцию. Эти проблемы не возникают у немагнитиваемых колпачковых колец, и поэтому они используются сегодня в большинстве мощных генераторов.

While the diameter of the retaining rings depends on the type (two or four- pole) and the capacity of the generator, the length of the rings is also dictated by the coil head design. The rings for water- cooled rotors are the longer ones.

As generator units become larger the retaining rings are subjected to increasing stresses. Very exacting and high demands are therefore made on the rings and on the methods by which they are manufactured. The material from which retaining rings are made must therefore meet the following four requirements:

- high 0,2 % proof stress
- adequate cold and hot formability
- sufficiently high thermal expansion
- non- magnetizability in most cases.

The first three properties are necessary because of the stresses stemming from the design of the rotor body and for assembly reasons. Non- magnetizability is required because when ferro- magnetic materials move through an electric field eddy currents are generated which result in power losses and make further demands on the already sophisticated generator cooling system. The temperature rise occurring in a magnetizable retaining ring during operation must not endanger the shrink to fit of the ring nor damage insulation. These problems do not arise with non magnetizable retaining rings and these are therefore used in most of today's high- capacity generators.

Разработка колпачковых колец

С самого начала производства турбогенераторов в начале столетия, когда благодаря разработкам С.Е.Л. Brown постоянные магниты были заменены вращающимися производителями тока, известна проблема нагруженности головок обмотки центробежными силами.

Первое, себя зарекомендовавшее, конструктивное решение проблемы была бандажная проволока. Довольно рано также были выражены желания по немагнитизируемому колпачковым кольцам.

Записи о материалах для немагнитизируемых колпачковых колец уходят в наше предприятие в 1901 год. В этом году С.Е.Л. Brown впервые расположил обмотку в пазах, расположенных по периметру роликового якоря.

Обзор по разработке сплавов для немагнитизируемых колпачковых колец предлагается в таблице 1, в которой содержатся выдержки из старых анализных книг нашего предприятия. При записях из 1901 года идёт речь без сомнения вообще о первых разработках сплавов для немагнитизируемых колпачковых колец. Первое пробное кольцо в то время размером 720/520 мм в диаметре и длиной 390 мм было ковано и опробовано.

Очевидно тогда со свойствами только в ковном состоянии не были довольны. Имеющиеся документы указывают на обширные испытания диффузионного отжига. Достигнутый маленький предел текучести 0,2 в отожжённом состоянии не представлял однако альтернативу к применяемым в то время бандажным проволокам. Из маломанганизируемых материалов, в большинстве из высоконикелевых сталей.

The development Of retaining rings

Ever since the beginnings of turbogenerator construction at the turn of the century when a development by C.E.L Brown enabled permanent magnets to be replaced by power generators with rotating armatures, design engineers have been familiar with the problems of centrifugal forces acting on the coil heads.

Initially this problem was successfully tackled by the use of wire bandages. It was suggested at a relatively early stage, however, that non-magnetizable retaining rings should be used.

At Krupp, records on non-magnetizable materials for retaining rings are going back to 1901, the year in which C.E.L Brown first accommodated the field coils in slots distributed over the circumference of the rotor body in axial direction.

Table 1, containing extracts from old analysis records of our company, gives an outline of the development of non-magnetizable retaining rings alloys. The company records of 1910 without doubt relate to the first alloys ever developed for the manufacture of non-magnetizable retaining rings. A first experimental ring measuring 720/520 mm \varnothing ($\approx 28'' / \approx 20''$) in diameter and 390 mm ($\approx 15''$) in height was forged and tested at that time.

The properties of that ring in the as-forged condition were evidently found to be unsatisfactory. The records indicate that extensive solution heat treatment tests were carried out. Owing to the low 0,2 % proof stress obtained in the heat treated condition, however, the material did not represent an acceptable alternative to the wire bandages used at the time which were made of low permeability materials, usually high-nickel steels.

Год разработки Year	Крупн/VSG Марка стали steel brand	Химический состав в вес. ед. % Chemical composition in % b.wt.								
		C	Si	Mn	Ni	Cr	V	W	N	
1901	BRUV	0,79	0,24	4,48	16,00	–	–	–	–	
1910	MBR 22 C	0,27	0,20	0,44	21,80	3,00	–	–	–	
1925	P 287*	–	–	6,00	8,50	10,25	–	–	–	
1925	P 288*	–	–	6,00	8,50	3,50	–	1,50	–	
1925	P 289*	–	–	6,00	6,50	10,25	–	0,80	–	
1925	P 290*	–	–	7,50	7,50	4,25	–	–	–	
1926	P 323*	0,56	0,18	8,22	10,10	4,15	–	–	–	
1926	P 324*	0,57	0,13	11,10	4,19	4,39	–	–	–	
1928	EFC 212 G	0,55	0,40	5,00	12,50	3,60	–	–	–	
1928	EC 202 G	0,60	0,40	5,00	15,00	–	–	–	–	
1934	EFC 284	0,20	0,40	6,00	10,00	11,50	–	–	–	
1938	EFC 212 W	0,58	0,40	7,50	8,50	4,00	–	0,60	–	
1939	CF 87212	0,48	0,40	17,50	–	3,00	–	–	–	
1939	CF 6724	0,32	0,38	18,00	–	1,00	–	–	–	
1954	P 750* (UKR)	0,53	0,80	18,00	–	4,50	0,10	–	0,10	
1958	P 794*	0,60	0,25	15,00	–	15,00	2,00	–	–	
1960	P 805*	0,52	0,40	20,00	–	14,00	1,20	–	–	
1967	P 870*	0,65	0,75	19,50	1,50	6,20	0,10	–	0,14	
1975	P 898*	0,55	0,40	20,00	1,00	6,00	–	–	0,10	
1975	P 899*	0,50	0,50	18,00	0,40	4,65	0,55	–	0,10	
1975	P 900*	<0,12	0,30	18,50	–	18,50	–	–	0,50	
1981	P 900 N*	<0,12	1,00	18,50	<1,00	18,50	–	–	1,00	
		* Качество проб как марки для испытаний до регулярной выплавки					*Trial grades before regular production.			

P 900 N+Mo
P 2000

Таблица 1
Разработка сталей для
ненамагничиваемых колпачковых
колец в нашем предприятии в
промежуток времени от 1901 до
1988 года

Table 1
Development of non- magnetizable
Steel for retaining rings at our com-
pany between 1901 and 1988?.

В 1924/25 годах фирмой Крупп были изготовлены первые колпачковые кольца из предшественников материала „EFC 212 G“, причём окончательнаяковка была осуществлена так называемой горяче-холодной ковкой молотом при температуре примерно 550° C. Опробование колец показало сильно изменяющиеся механические и технологические свойства материала по периметру. Причиной этому уже тогда была определена неравномерная деформация при к тому же не постоянно выдерживаемой температуре.

Однако было замечено, что путь в целом правилен и использованный материал пригоден для повышения прочности путём „холодной деформации“.

Тем самым был сделан первый шаг в направлении холодного расширения и поставлены стрелки для техники производства, которая сегодня уже настолько усовершенствована, что могут изготавливаться колпачковые кольца для самых больших строящихся сегодня турбогенераторов.

В 1928 году нашим предприятием был поставлен фирме Сименс-Шукерт первое холодно расширенное колпачковое кольцо с пределом текучести 0,2 в 700 МПа. До этого момента были изготовлены в рамках так называемого „исследования большого количества“ 25 колпачковых колец, причём холодное упрочнение повышалось шаг за шагом.

Во время этих испытаний был введён ещё сегодня применяемый способ расчёта степени расширения. Исходя из размера готового колпачкового кольца можно просчитать процентное расширение в отдельных промежуточных операциях. Чтобы отличить уширение деформацией от степени растяжения,

In 1924/25 Krupp manufactured the first retaining rings from „fore-runners of the material EFC 212 G“. The rings were finished by a hammer forging operation, known as hot-cold forging, at approx. 550°C (≈ 1020°F). Tests showed widely varying mechanical properties over the circumference of the rings. Even at that time it was established that this was caused by non-uniform deformation at temperatures which could not be kept constant.

Nevertheless it was realized that the approach was right in itself and that the strength of the material used could be increased by „cold forming“.

Thus the first step towards cold expansion had been taken and the way paved for a production technology which is now so advanced that retaining rings can be made for the largest turbo-generators currently being built.

In 1928 we supplied Siemens-Schuckert with the first „cold expanded retaining ring“. It had a 0,2 % proof stress of 700 MPa (≈ 102 ksi). By that time approximately 25 retaining rings had been manufactured under a programme known as „large-number research“, in which the amount of work hardening was increased step by step.

During these tests the „degree-of-expansion“ method of computation still used today was introduced. Proceeding from the finished size of retaining ring, the percentage expansion in the various intermediate stages can be calculated. In order to differentiate expansion from deformation (stretching rate), this compu-

то это значение у нас в предприятии называется „расширение по Сингвалд“ (по имени нашего сотрудника, который в 20-х годах ввёл этот метод расчёта). При первых испытаниях короткие конусные клины продавливались через колпачковые кольца, причём при этом возникали значительные трудности. Кроме того этот способ со „свободными“ клинами был не безопасен из-за молниеносного вылета клина после его продавливания. В конце 20-х годов было сконструировано первое расширяющее устройство с внутренними сегментами и „расширяющим клином“. Ещё сегодня успешно применяется дальнейшее развитие этого способа. В виде смазочного материала для чрезвычайно высоких удельных давлений использовалась тогда и сегодня особая смесь из графита и воды. Требования заказчиков по пределу 0,2 в 30-х годах быстро росли и в 1939 году достигли примерно 900 МПа.

Отсутствие валютных средств и результирующий из этого, недостаток никеля после 1933 года привёл к тому, что содержание никеля в материале „EFC 212 G“ постоянно снижалось вплоть до того, что в конце концов всё содержание никеля было заменено марганцем (материал „CF 87212“). Это потребовало некоторых изменений в производственном процессе, но однако не могло задержать дальнейшее развитие немагнитизируемых колпачковых колец. Разработка материала привела от „CF 87212“ через „CF 6724“ к материалу „P750“ (UKR), который свыше 30-ти лет был стандартным материалом для производства колпачковых колец. С материалом P900 впервые была разработана сталь для колпачковых колец, стойкая против коррозионного растрескивания, которая в середине 80-х годов была принята всеми производителями генераторов во всём мире.

ted expansion rate is designated at our company as „Singwald expansion“ (after the KRUPP engineer who introduced it in the late 1920s). In the initial experiments short conical wedges were forced through the rings. This involved considerable handling difficulties and was not without danger owing to the bullet-like expulsion of the wedges after being forced through the rings. In the late 1920s the first expanding device with internal segments and an „expanding wedge“ was devised. A refined version of this process is still successfully used today. In order to cope with the extremely high surface pressing a special mixture of graphite and water was, and still is, used as lubricant. In the 1930s customers' 0,2 % proof stress requirements became rapidly more exacting, and in 1939 the highest value specified was approximately 900 MPa (≈ 130 ksi).

Lack of foreign exchange and the resultant shortage of nickel in Germany after 1933 led to a continual decrease in the nickel content of the material „EFC 212 G“ until finally the nickel had to be entirely replaced by manganese (material CF 87212). While this necessitated certain changes in the production procedure, it did not prevent the further development of the non-magnetizable retaining ring. This development ultimately led from „CF 87212“ via „CF 6724“ to the material „P750“ (UKR), which was the standard material for the manufacture of retaining rings for more than 30 years. P900 was the first retaining ring steel to be resistant to stress corrosion cracking and in the mid-1980s it received the approval of all generator manufacturers worldwide.

В последние 25 лет постоянное увеличение турбогенераторных единиц потребовало всё более высокие пределы текучести 0,2 во всё меньшие промежутки времени. Самое высокое требование заказчиков в настоящий момент находится при пределе 0,2 в 1450 МПа. Эти свойства могут быть достигнуты ещё с материалом P900. Дальнейшим требованием является однако растущая температура работы генераторов, которая требовала разработку такого материала, который, имея все свойства материала P900, однако при температуре эксплуатации в примерно 150° С является стойким против коррозионного растрескивания и теряет по пределу текучести при растяжении менее 250 МПа. Но и эти экстремально высокие требования не являются последним уровнем для немагнитных материалов. Ведь требование по ещё большим и более экономичным мощностям остаётся наверняка.

The past 25 years have seen a steady increase in the size of turbogenerators, requiring the use of retaining ring materials with ever higher 0,2 % proof stress values. The highest 0,2 % proof stress currently specified by customers is 1450 Mpa.

These properties will still be reached with the material P 900. But a further requirement is the rising operating temperature of the turbogenerators which made it necessary to develop a material which has all properties of the grade P 900 but which has to be resistant against stress corrosion cracking at a temperature of 150°C and lose less than 250°C MPa on yield strength. But even this value, albeit extremely high for work hardened materials, will certainly not be the last word as the trend towards even larger and more cost-efficient power generating units will surely persist.



Рисунок 2
Электродуговая печь

Picture 2
Electric arc furnace

Технологический маршрут производства ненамагничиваемых колпачковых колец

Исходным материалом для наших колпачковых колец являются выплавленные в дуговой печи электроды, которые для улучшения степени чистоты материала были переплавлены в нашей установке электрошлакового переплава (ESU) или в установке электрошлакового переплава под давлением (DESU). В соответствии с типом колец изготавливаются блоки различного диаметра и веса; самый большой диаметр это 1000 мм и самый большой вес это 25 т. Тем самым могут все, в настоящий момент нужные, типы колпачковых колец изготовлены из переплавленной стали.

Во многих операцияхковки и промежуточных нагревов формируется заготовка колпачкового кольца. После предварительной обточки кольца подвергаются диффузионному отжигу и затем холодному упрочнению с тем, чтобы достичь требуемый предел 0,2. Этот рабочий шаг производится на прессе, мощностью в 6000 т, который был построен специально для расширения колпачковых колец. Отжиг для снятия напряжений и чистовая обработка заключают производственный процесс.

Production procedure for non-magnetizable retaining rings

As starting material for our retaining rings we use cast electrodes of electric-arc furnace steel which are remelted in our electro-slag remelting (ESR) plant or in our pressure electroslag remelting plant in order to improve the cleanliness of the material. We produce remelted ingots of different diameters and weights to suit the different types of rings. The largest ingot diameter is approx. 1000mm ($\approx 39''$), the maximum weight 25 metric tons (56 kip). Thus, retaining rings of all type currently required can be made of remelted steel.

The ingot is formed in several forging and reheating operations to produce a ring blank. After rough turning, the ring is solution heat treated and then work hardened so as to obtain the desired 0,2 % proof stress.

The latter operation is carried out on a 6000 metric ton press specially designed for cold expanding of retaining rings. A stress relieving heat treatment and finish machining complete the Production process.

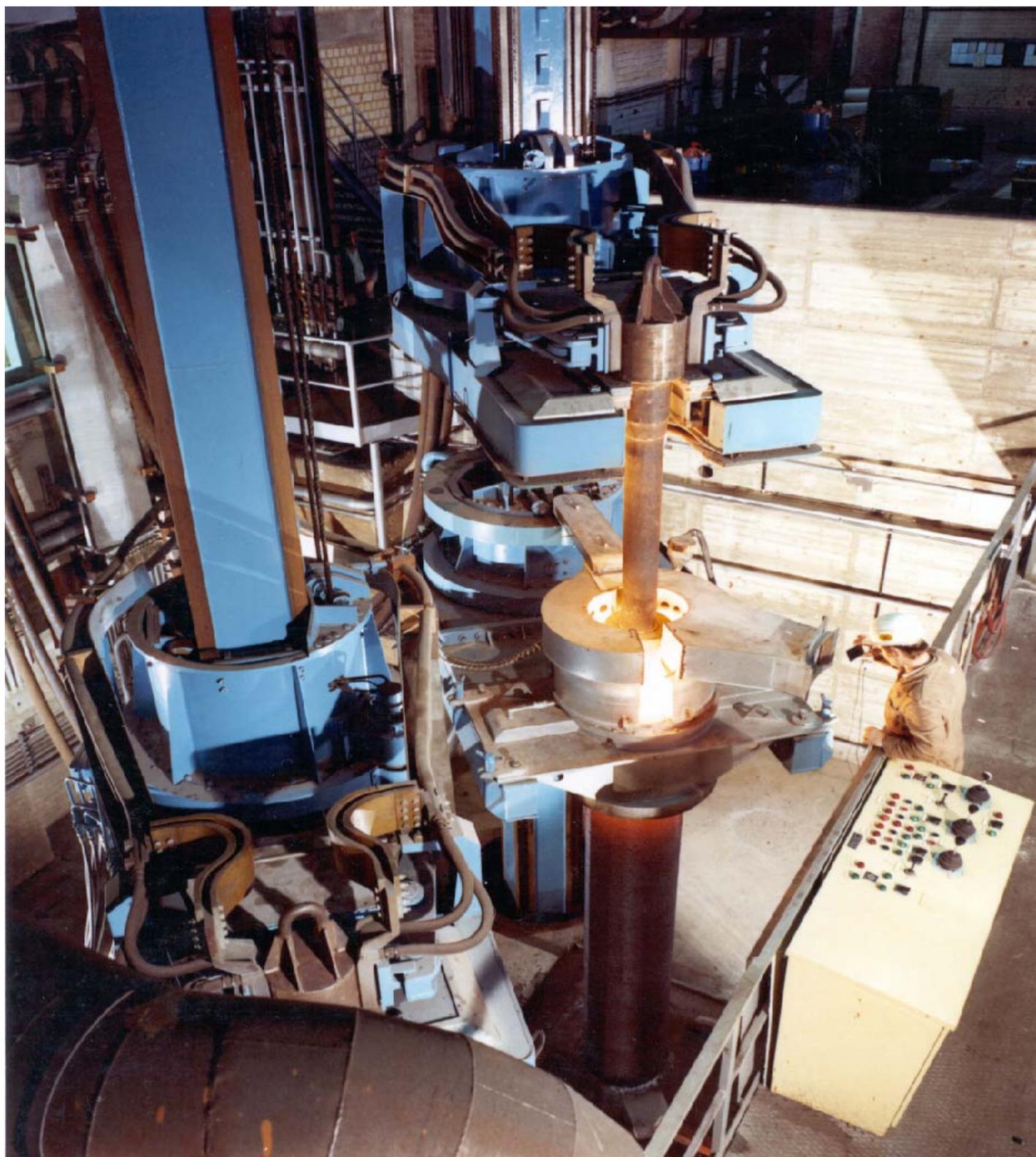


Рисунок 3
Установка электрошлакового
переплава

Picture 3
Electro - slag remelting unit



Рисунок 4
Обжатие предварительно
вытянутого переплавленного
участка блока

Picture 4
Upset forging of a preforged
section of an ESR ingot.

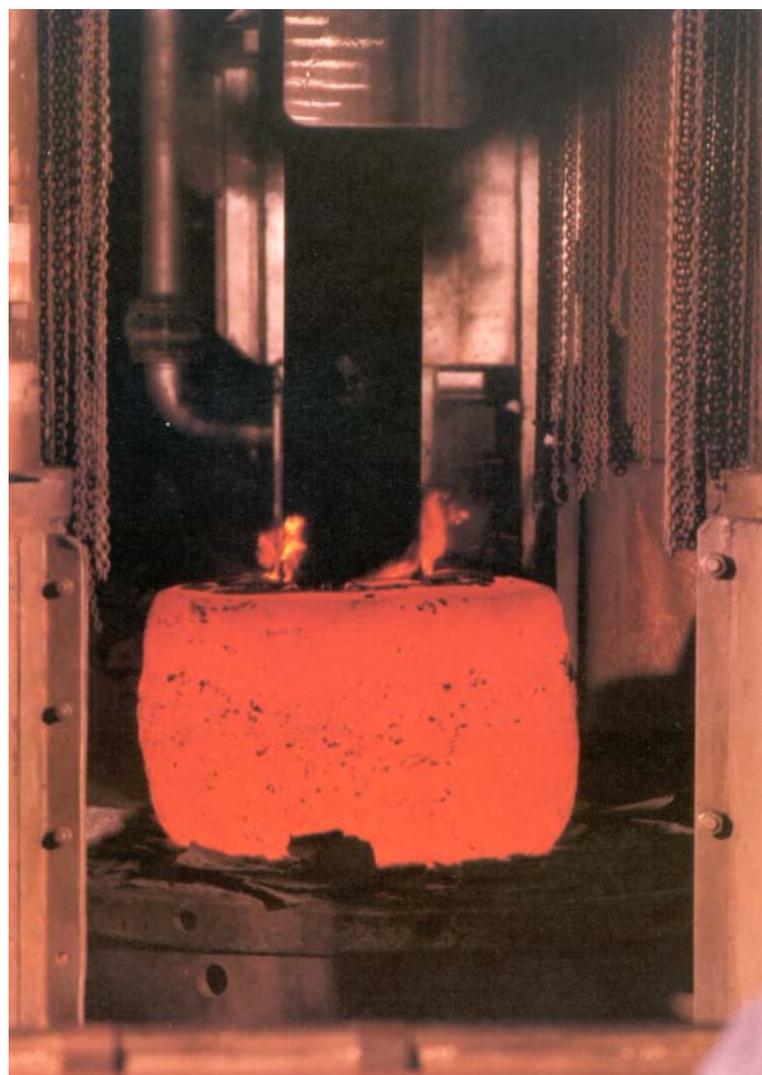


Рисунок 5
Прошивка обжатого утолщения

Picture 5
Punching of an upset-forged blank.

Рисунок 6
Проверка размерности готового
кованого колпачкового кольца

Picture 6
Dimensional check of a retaining
ring after finish forging.



Рисунок 7
Пролёт механических
мастерских с колпачковыми
кольцами в различных стадиях
обработки

Picture 7
Part view of machine shop with
Retaining rings in different stages
of machining.



Рисунок 8

Закалка диффузионно
отожжённого колпачкового
кольца

Picture 8

Quenching of a retaining ring after
solution heat treatment.





Рисунок 9

Холодное расширение
колпачкового кольца на прессе,
мощностью в 6000 т

Picture 9
Cold expanding of a retaining ring
on the 6000-t press.



Рисунок 10
Чистовая обработка

Picture 10
Finish machining