

ELEKTRİK MAKİNALARININ TASARIMIYLA İLGİLİ OLARAK BAKIRIN MEKANİK ÖZELLİKLERİ

Elek Yük. Müh. Ekrem ALTINLI
TEMSAN A.Ş.

ÖZET

Mekanik dayanıklılık bakımından saf yumuşak bakırın, her durumda, elektrik makinalarının tüm sargılarının imalatında kullanılması, yeterli mukavemeti sağlayamaya bilir. Mekanik mukavemet özelliklerinin artırılması, bakırın ya haddelenerek ya da alaşım halinde kullanılmasını gerektirir. Haddelenmiş bakır, zaman ve sıcaklığın etkisiyle yumuşayacaktır. Bundan dolayı, elektrik makinalarının sargılarında oluşacak kısa devrelerden veya aşırı yük durumundan nasıl etkileneceğini tahmin etmek önem kazanacaktır. Normal şartlar altında, anma gücünde çalışan herhangi bir elektrik makinasının sargılarında kullanılan bakırın mekanik mukavemet değerlerinde herhangi bir azalma meydana gelmeyeceği laboratuvar araştırmalarından ortaya çıkarılmıştır.

GİRİŞ

Elektrik makinası tasarımcıları, sargılarda kullanacakları iletkenlerin malzemesinden farklı, fakat birbiriyle çelişen isteklerin beklentisi içerisinde. İlk önce, malzeme kolayca bükülebilirdir. Böylece zorluk çıkarmaksızın şekillendirilebilirdi ve nisbeten küçük basınçlar altında, birleşme yerleri pabuçlarla sıkıştırılabilirdi. Bunların yanı sıra, aynı sargılar ne kısa devre gerilmeleri altında çok fazla biçimsel bozulmaya maruz kalmalı ne de izin verilebilir en büyük işletme sıcaklıklarında yıllar sonra bile mekanik mukavemetlerini kaybetmemelirdiler. Aynı zamanda, iletken malzemesi çok iyi elektriksel iletken-

liğe sahip olmalı, şekillendirme açısından kolay gerilebilirdi veya kalıplara sokulabilirdi, rahatlıkla sert veya yumuşak lehimlenebilirdi ve yahut da kaynak edilebilirdi. Elektrik makinalarında, hemen hemen çoğunlukla, öz direnci 0.017241 mikro-ohm-metre'den daha büyük olmayan (IACS'ye göre % 100) saf bakır kullanılır.

Bakırın çok büyük bir kısmı elektroliz ile arıtılmış biçimde kullanılır. Bu işlemde, ham bakır anoda yerleştirilmiş olan, saf bakır da katodda toplanandır. Bakırın çoğu zengin bakır yataklarına sahip bölgelerden çıkarılır. Bunlar doğrudan doğruya elektriksel yolla arıtılmazlar. Genellikle alev ile fırınlarda arıtılırlar. Bunlar daha az saftır ve genellikle alaşım yapmada yararlanılmak üzere döküm bakırı olarak kullanılırlar. Elektrolizle elde edilen bakır da alaşım yapmak üzere doğrudan doğruya kullanılabilirler. Şayet bakır çeşitli biçimlerde imal edilmek üzere haddelenecek ise eritilerek çubuk, kütük ve kalıplar halinde dökülür.

Bakır içerisinde oksijenin mevcudiyeti, onu biraz daha sertleştirmesi bakımından arzu edilen sonucu ortaya çıkarır. Bu aynı zamanda belirli oranda saflığı bozan maddelerin etkisini yoketmede yararlıdır. Oksijeni ortadan kaldırmak için bakır ısıtılırsa, onun zararı kendiliğinden ortaya çıkar. Çünkü, bu durumda gevrekleşir. Mekanik mukavemeti olumsuz yönde değişir. Bakırdan oksijenin çıkarılması işlemi genellikle ona fosfor ilave etmekle gerçekleştirilir. Fakat bunun da sakıncası vardır, bakırın öz iletkenliğini azaltır. Öz iletkenliği yüksek ve

yoğunluğu fazla olan oksijensiz bakır elde etmek de mümkündür. Bu, ancak hava ile temas etmeksizin bakırın eritilip kalıplara, çubuk ve kütük halinde dökülmesiyle elde edilir. Oksijeni çıkarılmış bakır gibi bu da arıtılmış bakırdan daha yumuşaktır. Genel bir bilgi verilmesi açısından Tablo 1 hazırlanmıştır (1). Uygulama yönüne göre sertlik ve mukavemetini artırmak için soğuk çekme ve haddemele işleminden sonra, bakır; levha, çubuk ve boru şeklinde kullanılabilir.

TAVLANMIŞ BAKIRIN ÖZELLİKLERİ

Elektrik makinalarının sargılarının tasarımında; malzemenin beklenen en önemli mekanik özellikler şunlardır: Esneklik sınırı, akma gerilmesi, esneklik modülü ve sertliktir. Fakat genellikle, kopma gerilmesi ve uzama da bütünlük oluşturması için birlikte verilebilmektedir. Tavlama işlemi, zamana bağlı olarak 370°C ile 760°C arasında ısıtmak ve ani soğutmak suretiyle gerçekleştirilebilir. Karşılaştırma yapma bakımından tavllanmış bakır ile haddelenmiş bakırın mekanik özelliklerini vermek üzere Tablo 2 hazırlanmıştır (2)

ALAŞIM YAPMAK SURETİYLE MEKANİK MUKAVEMETİN ARTIRILMASI

Elektrik makinalarının anma gücünün, son yıllarda bir hayli artmasıyla beraber, alan kaçaklarının miktarında da artmalar oldu. Bunun sonucu olarak sargılardaki kısa devre kuvvetleri ve gerilmeler de artarak, bir sorun olmaya başladı. Aşık, fakat ekonomik olmayan bir yöntem, iletken kesitini, akımın taşınması için gerekli olanın ötesinde artırmaktır. Çok daha etkili bir yöntem ise, saf bakır yerine alaşımlı bakırdan oluşmuş iletkenler kullanarak sargının mukavemetini artırmaktır.

Ne yazık ki gümüş haricinde, bakırın mekanik mukavemetini artırmak için ona ilave edilen her element, onun elektriksel iletkenliğine zıt yönde etkide bulunacaktır, örneğin, bakıra % 10 oranında alüminyum ilavesi, onun mekanik mukavemetini % 100 artırır. Buna karşın, iletkenliğini 6 kat azaltır (yani iletkenliği IACS'ye göre % 16.7'ye düşer). Az miktarda kadmiyum (% 0.8) ilaveli bakır alaşımları, yüksek gerilimli enerji nakil hatlarının iletkenlerinde, yüksek mukavemetli oldukları için kullanılmaktadır. Fakat bu, iletkenlikte % 20 azalmaya karşılık düşer ki böyle alaşımlar elektrik makinalarının sargılarında kullanılmaz. Çeşitli bakır alaşımlarının elek-

triksel ve mekaniksel özelliklerini içeren bilgiler Tablo 3'de verilmiştir.

Doğal olarak, bazı bakır cevherlerinde az miktarda gümüş mevcuttur. Böyle, az miktardaki (% 0.1) ilaveler, iletkenliği azaltıcı yönde pek etki etmezler. Aynı zamanda, bu orandaki katışıklıklar saflığı bozucu olarak kabul edilmezler. Bunun yanı sıra, bu düzeydeki gümüş katışıklığı, bakırın mekanik özelliklerine gerçekten de etki etmezler. İleride görüleceği üzere; gümüş ilavesinin yararı, sadece haddelenmiş bakırın yumuşama davranışını etkilemesinden dolayıdır.

SOĞUK HADDELEMEYLE MEKANİK MUKAVEMETİN ARTIRILMASI

Bakır için haddemele; yeniden kristalleşme sıcaklığının altında bir ısıda esneklik sınırının üzerinde bir kuvvetle, germe işlemi olarak tanımlanır. Bakır iletkenleri hafifçe haddemele; onu oda sıcaklığında sarıp sarmalamak, bükme veya kalıpla çekmek demektir. Bu şekilde, bakırın mekanik özelliklerinde olumlu yönde önemli düzeyde artmalar olur. Bu durum Tablo 2'de açıklıkla görülmektedir. Bu yolla, soğuk haddelenmiş bakırın iletkenliği, yaklaşık % 1 mertebesinde azalır. Fakat bu azalma IACS değerinden fazla bir sapma meydana getirmez.

İLETKEN İMALATI

Bakır teller kütük diye adlandırılan malzemeden haddelenerek elde edildiğinden dolayı; genellikle yuvarlak veya dörtgen kesitli şekillendirilmiş ve kangallar haline getirilmiş oldukları için; iletken imalatı işleminde, soğuk haddemeleden kaçınılması imkansızdır. Haddemele sonrası ortaya çıkan istenmeyen sonuçlar, iletkenin yalıtılmadan önce gruplar halinde tavlama ile ortadan kaldırılabılır. Kısmi tavlama ile istenilen mukavemeti elde etmek, uygulama yönünden imkansızdır. Grup tavlama sonrasında, mukavemette fazla bir artış olması istenmez ise sonraki işlemlerde çok dikkatli davranmak gerekir.

Kangal yapma ve onu açma ile yalıtım esnasındaki işlemlerde iletken bir miktar haddemele işlemine maruz kalır. Fakat bu işlem, normalde iletkenin akma gerilmesinde % 20'den daha fazla bir artış meydana getirmez. İletkenleri vernikle emaye kaplama veya vernikle camyünü kaplama biçiminde yalıtkan veyahut da çok süratli hızlarla demet haline getiren makinalarda, bu haddemele işlemi daha şiddetli gerçekleşir.

TABLO1

MALZEME	Kimyasal Bileşim %		Akma Gerilmesi daN/mm ² .		Çtkme Gerilmesi daN/mm ² .		Uzama % 50.8 mm'de		Sertlik "Rockvell"		Yoğunluk gr/cm ³ .	Elektriksel iletkenlik IACSSS	Erime noktası °C
	Cu	Diğer	Yumuşak	Sert	Yumuşak	Sert	Yum.	Sert	Yum.	Sert			
Elektriksel yolla arıtılmış, bakır	levha tel çubuk	99.92 0.04 0	6.9	31.1	22.1	34.4	50	12	F40	B50	8.91	101	1083
			6.9	30.3	22.1	30.3	55	16	F40	B47			
Oksijensiz bakır		99.95	6.9	31.0	22.1	34.4	55	16	F40	B47	8.94	101	1083
Oksijeni fosforla alınmış bakır		99.9 0.02P	6.9	27.6	22.1	33.1	50	15	F45	B50	8.94	85	10Ü3

TABLO 2

MALZEME	Çekme gerilmesi daN/mm ² .	Akma gerilmesi daN/mm ² .	Uzama %	Sertlik "Brinell"
Tavlınmış, bakır	22.0	3.45	58	45
Soğuk çekilmiş bakır	47.0	6.9	4	100

TABLO 3

MALZEME	Kimyasal Bileşim %		Akma Gerilmesi daN/mm ² .		Çekme Gerilmesi daN/mm ²		Uzams % 50.8 mm'de		Sertlik "RockveH"		Yoğunluk gr/cm ³ .	Elektriksel iletkenlik IACS %	Erime noktası °C
	Cu	Diğer	Yumuşak	Sert	Yumuşak	Sert	Yumuşak	Sert	Yumuşak	Sert			
Gümüş bakır	99.92	0.08 Ag			25		15	20	HB65	HB82	8.89	98	1075
Alüminyum bakır	91.5	3.5 Al			45.8			35	HB90	HB140	7.7	14	1075
Tellur bakır	99.5	0.5 Te	7.9	35.1	23.7	35.3	46	10	F40	B50	8.94	95	1075
Kükürt bakır	99.7	0.4 S	7.1	34.4	24.4	35.8	42	12	F40	B45	8.94	93	1076
Zirkonyum bakır	99.5	0.15 Zr	7.9	46.6	26.5	50.2	50	5	F40	B75	8.38	93	1080
Berilyum bakır	98.1	2.15 Be	21.5	60.9	50.2	84.5	45	17	660	B102	8.25	17	1068
Trom bakır	98.1	0.85 Sn	13.7	42.3	24.4	48.0	40	14	E16	B79	8.88	85	1075

Bakır iletkenin enkesitinde soğuk haddelenme düzgün dağılım göstermez. Bu yüzden haddelenmiş bakırda, akma gerilmesi gibi bir mekanik özelliğin, önceleri yapılan araştırmalara göre (3), yüzey sertliğinin belirlenmesinde geçerli bir öngörü olduğu söylenemez idi. Daha sonraları yapılan araştırmalarda ise haddelenmiş sert bakırın enkesitinde gerçekleştirilen sertlik ölçmeleri, yukarıdaki tesbiti desteklememiş ve sertliğin akma gerilmesi ile doğru orantılı olduğu sonucu çıkarılmıştır (4, 5).

SARGILAR

Burada tüm elektrik makinalarının her birinin sargıları hakkında ayrı ayrı bilgi verilmeyecek, genel durumları gözden geçirilecektir.

Normal sargı işleminde, yalıtılmamış bakır iletkenler önce sarıldıkları kangallardan çözülecekler, sonra düzeltilmeleri için ya doğrudan silindirlerinden geçirilecekler ya da getirileceklerdir. Sonra sargının türüne göre yalıtılacaklardır. Yalıtma işleminden geçerken de çeşitli mekanik işlemlere maruz kalacaklardır. Daha sonra bu yalıtılmış iletkenler gerekirse demet haline getirilip ve ardından sargı şeklinde biçimlendirileceklerdir. İşte bu işlemlerde de bakır mekanik mukavemet bakımından etkilere maruz kalacaktır. Yapılan araştırmalar, akma gerilmesi 8.30 daN/mm² olan yalıtılmış bakır iletkenin sargı haline getirildikten sonra, türüne bağlı olarak akma gerilmesinin 10.40 ile 13.50 daN/mm² mertebesine çıktığını göstermiştir.

Keza, yukarıda bahsedilenlere ilaveten, sargının imalatındaki çapraz geçişler ve yer değiştirmeler de

bölgesel haddelenmeler meydana getirir. Bu özellikler iletkenler üzerinde şiddetli gerilme artmalarına neden olur. Bunun sonucunda da iletken boyutlarına nazaran bükümlerin boyutları çok küçük ise ve iletken israfından kaçınılıyorsa özel bükme teçhizatlarına gereksinim doğar.

ZAMANA BAĞLI OLARAK SICAKLIK İLE MEKANİK MUKAVEMET DEĞERLERİNİN AZALTILMASI

İmalat

Sargı üretim tesislerinde, makina ile konum değiştirilerek yapılacak denetlerde kullanılan iletkenler, vernikle kaplanmış ve üzerleri camyünü ile örülmüş ve emprenye edilmiş şekilde kullanılırlar. Bu işlemler, ince ve art arda vernik ve camyünü ile yapılan yalıtımı pişirmek için iletkenleri yüksek sıcaklıklı (180 ile 300°C arası) fırından geçirmeyi gerektirir. İşte bu geçiş için gerekli sürede de yalıtım hem kurutulur hem de pişirilir. Soğuk haddelenmiş iletkenlerin akma gerilmelerinin, bu anılan ısıl işlem ile fazla etkilenmedikleri deneylerle açığa çıkarılmıştır. Üretim tesislerin de; elektrik makinası sargıları, belirli bir yumuşama etkisi gösterebilecek uzun süreli ve yüksek sıcaklıklı birkaç işlemle karşı karşıya kalır. Herhangi bir bakır kaynağı, bölgesel olarak iletken sıcaklığını ister istemez erime sıcaklığına yükseltir. Zaten bu sonuç da kaçınılmazdır. Sert lehimli (gümüş kaynağı diye de anılır) birleşmeler ise bundan biraz daha az, yaklaşık 200°C ile 300°C kadar aşağıda bir sıcaklık gerektirir. Fakat sert lehim işleminin süresi, bakır kaynağından genelde daha

uzun olduğu için, meydana getirecekleri yumuşama miktarlarında az çok farklılık olabilecektir.

Sargılarda sert lehimli veya kaynaklı birleşmelerden kaçınmak uygulama yönünden mümkün olmadığı için, sargı iletkenlerinin birleşme yerlerini yayma yoluna gidilir. Şayet böyle yapılırsa, bu yerlerde oluşacak yumuşamanın, sargının mukavemeti üzerine etkisi ihmal edilir düzeye iner. Sıcaklığın yumuşatma etkisinden tümüyle kurtulmak isteniyorsa, en azından kaynak veya sert lehimli birleşme kadar dayanıklı olan ve harici çıkışlarda da kullanılan kıvrılmalı veya pabuçlu civatalı bağlantı tercih edilmelidir.

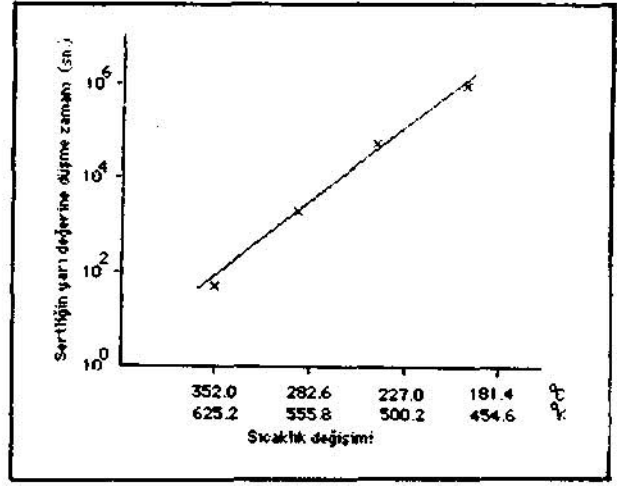
İletkenlere bölgesel ısı vermenin yanı sıra ondan farklı olarak ve genellikle tüm sargıların toptan ısıtıldığı yöntemler kullanılmaktadır. Birincisi; vernik ve camyünü ile yalıtılmış sonra demet haline getirilmiş iletkenlerden oluşmuş sargıların demetini oluşturan iletkenleri birbirine yapıştıran verniği pişirmek için, onun basınçlı veya basınçsız olarak ısıtılmasıdır. Yalnız burada kullanılan yalıtkan malzemelerin ısı sınıflarının dayanabildikleri en büyük sıcaklık sınırının geçilmemesi zorunludur. Aynı zamanda ısıtma süresi de 24 saati geçemez. İkincisi ise ana yalıtım sonrası gerek sargıları kurutmak gerekse pişirmek için kullanılan ısıtma işlemidir. Bunda da sargılar bağımsız olarak ısıtıldığı gibi sargılı magnetik devre de bir bütün olarak ısıtılabilir. Burada yalıtkanlar üzerinde herhangi bir tahribata neden olmamak için türe bağ sıcaklık sınırı aşılmamalıdır. İşte bu süre ve sıcaklık sınırlarının ileride değinileceği üzere yumuşama üzerine olan etkileri ihmal edilebilir.

Normal Çalışma

25 yıl öncesine kadar, daha fazla mekanik mukavemet elde etmek için soğuk haddelenmiş bakır kullanımının, sargı imalatı zorlukları açısından uygulama yönünden imkansız olduğuna ve bunun yanı sıra işletme sıcaklıklarının onu yumuşatacağına inanılırdı. Sargıyı meydana getiren iletkenlerin, fazla uğraşmaksızın zahmetsizce biçimlendirilebileceği ve uygulama yönünden herhangi bir sorunun çıkmayacağı bir sertlik derecesi olduğu, geçerliliğini hâlâ korumaktadır. Fakat; şimdilerde elektromekanik, elektro-hidrolik ve elektro-pnömatik sistemlerin arzu edilen düzeyde kumanda ve kontrol edilmesinden sonra sargı imalatı zorlukları uygulama yönünden biraz ortadan kalkmıştır. Sertlik derecesindeki her artış, onun ekonomik kullanılabilirliğine bir darbe indirir. 20.0 daN/mm²lik akma gerilmesi bu işlem için bir sınır değer olarak kabul edilebilir. Hatta bu sınır değerinin altında bile iletkenlerin oluşturulması ve konum değiştirme işlemleri daha iyi teçhizat ve tavlanmış bakırın biçimlendirilmesinde kullanılan işçiden daha yetenekli ve daha kaliteli işçiler gerektirir.

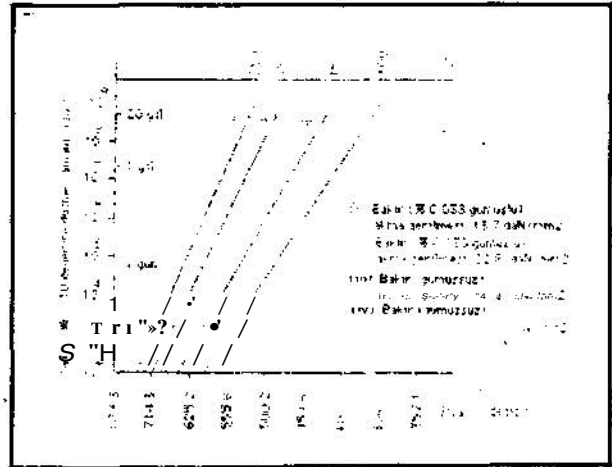
Anma çalışma şartlarının üzerindeki sıcaklıklarda çalışmanın süre ile birlikte sertlik üzerine etkisini ortaya koymak için; yüksek sıcaklıklarda ve daha kısa süreli deneylerden ortaya çıkan sonuçları, aralık dışı orantılı yaklaşım (extrapolation method) yöntemini kullanarak, öngörülerde bulunmak mümkündür. Bu, aynı zamanda yalıtkan malzemelerin mekanik ve dielektriksel özellikleri

aynı şartlarda (aşın gerilim de dahil) çalışma süresinin etkisini (diğer bir deyişle yalıtkanın yaşlanma süresinin tesbiti) tahmin etme sorununun aynısıdır. Bereket versin, soğuk haddelenmiş bakırın akma gerilmesi üzerine zaman ve sıcaklığın etkisi, Arrhenius kimyasal reaksiyon kanununu izler. Bu kanun, mutlak sıcaklık derecesi ile zamanın logaritmik değişimi arasında doğrusal bir ilişki olduğunu ve bu uygulamayla sertlik derecesinin, öncekinin belirli bir değerine düştüğünü açıklar. Şekil 1 soğuk haddelenmiş bakır için bu ilişkiyi göstermektedir (5). Bu örnekteki özellik değışimi, ilk yüzey sertliğinin yarı değerine inmesidir.



Şekil 1. Soğuk haddelenmiş bakırın sertliğinin yarı değerine düştüğü sıcaklık.

Arrhenius ilişkisi; herhangi bir malzeme için tesbit edildiği zaman, onun doğrusallık tabiatı, uzun zaman dilimleri için aralık dışı orantılı yaklaşım yöntemini kendiliğinden yürürlüğe koyar. Bir dizi araştırma sonuçlarının 20 yıla yansıtılması Şekil 2'de gösterilmiştir (6). Burada kullanılan örnekler, % 0.038 oranında gümüş içeren ve saf olan, ilaveten farklı akma gerilmesine sahip haddelenmiş bakırlardır.

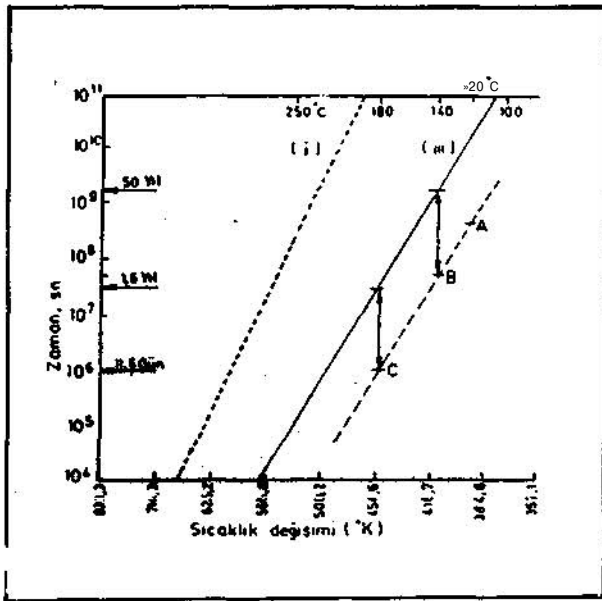


Şekil 2. Çeşitli bakır örneklerinde, uzun zamana genişletilmiş sıcaklığa bağlı akma gerilmesinin % 10 azalmasına karşılık düşen zaman değışimi

Bu eğrileri çizmek üzere gerekli bilgileri elde etmek için, $2.5 \times 7.6 \text{ mm}^2$ boyutlu bakır iletkenlerin uzunlamasına % 0.1 akma gerilmesi değerleri hem doğrudan doğruya imalat sonrası hem de ısı işleminden geçirildikten sonra, çekme gerilmesi ölçü aletiyle tesbit edilmiştir. Isıl işlem, deney parçasını birkaç saniyeden birkaç güne kadar değişen zaman aralıklarında, gerekli sıcaklığın \pm TC civarında bir banyoya daldırıp bekletmek şeklinde gerçekleştirilmiştir (6).

Arrhenius eğrilerine dayanarak elde edilen değişiklik, % 0.1 akma gerilmesini % 10 azalmasıdır. Yani eğri üzerinde alınan herhangi bir noktaya karşılık düşen zaman ve sıcaklık değerinde, akma gerilmesi 14.3 daN/mm^2 olan haddelenmiş bakırın yumuşayarak 12.9 daN/mm^2 akma gerilmesi değerine düştüğü gözlemlenmiştir.

Elektrik makinalarında aşırı yük etkisini tesbit etmek için, Şekil 3'de gösterilen eğri kullanılır. Bu elektrik makinalarında kullanılan haddelenmiş bakırda meydana gelebilecek eh genel değişikliği gösterir. Bu şekildeki sürekli çizgi ile gösterilmiş doğru, Şekil 2'deki % 0.1 akma gerilmesi 14.3 daN/mm^2 olan haddelenmiş bakıra ait (iii) ile anılan doğrudur. A noktası 120°C 'da 20 yıla karşılık düşer. Daha başka bir deyişle, orta ve büyük güçlü bir elektrik makinası sargısının, anma gücünde sürekli çalıştığı anma ömrüdür. Sürekli çizgi biçimindeki doğruya A noktasından geçecek şekilde paralel kesik çizgili doğru çizilmiştir. Sırasıyla 140°C ve 180°C 'a karşılık düşen B ve C noktaları işaretlenmiştir. Bu B ve C noktaları altında göz önüne alınacak elektrik makinasının aşırı yük durumlarına karşılık düşer. Bu noktalardan yatay eksene paraleller çizerek dikey zaman eksenini keselim. 120°C 'ın 20 yıllık yumuşatma etkisiz kesik çizgili doğru üzerinde 140°C için yaklaşık 2.22 yıl değerine, 180°C için ise 11.6 gün değerine karşılık düşer. B ve C noktalarından yatay eksene dikler çikalım ve eğrimizi keselim. Kestiği noktalardan yatay eksene paraleller çizerek zaman eksenini keselim. Zaman ekseninde kes-



Şekil 3. Aşırı yük etkisini gösteren eğri

tiği noktalar 140°C için 50 yıl, 180°C için de 1.6 yıl gibi değerler ortaya çıkar. Bunlardan görüleceği üzere haddelenmiş bakırın % 0.1 akma gerilmesinin % 10 azalması için 140°C 'da 50 yıl, 180°C 'da 1.6 yıl bekletilmesi gerekecektir. Aşırı yükte çalışması gereken süre 140°C için $50 - 2,2 = 47,8$ yıl, 180°C için de $(1,6 \times 365 = 584 \text{ gün}) - 11,6 = 572,4$ gün olacaktır. 47,8 yıl elektrik makinası sargısı ömründen çok çok fazla olduğu gibi sıcaklığın 180°C 'a çıkması da imkansızdır. Çünkü buna müsaade edilmez. Diğer bakır sertlikleri ile diğer sıcaklık ve zaman bileşenleri benzer biçimde ele alınabilir ve değerlendirilebilir.

Kısa Devre

Çeşitli standartlar 2 sn.'lik bir kısa devre sonucunda elektrik makinası sargısından ulaşılabilecek sıcaklık 250°C olarak sınırlandırılmıştır. Şekil 3'den, böyle bir sıcaklıkta, yukarıda anılan bakırdan yapılmış elektrik makinası sargısının % 0,1 akma gerilmesini % 10 azaltmak için gerekli sürenin 1,4 gün olduğu sonucu çıkarılır. Kesikli çizgi ile gösterilmiş doğruyu 250°C ile kesişecek şekilde uzatırsak, 100°C 'da 20 yıla karşılık düşen değer 100 sn. gibi çok küçük bir değere düşecektir. Sonuç olarak bu değer 1,4 gün gibi bir değer yanında ihmal edilebilir olacaktır. Şekil 3'teki nokta nokta çizilmiş doğru, Şekil 2'deki (i) eğrisinden alınmıştır. Bu eğri, gümüşün yumuşama üzerine etkisini göstermektedir. Bu doğru, bahsi geçen malzemede, % 0,1 akma gerilmesi değerinde % 10'luk bir azalma meydana getirmek için 250°C 'da 20 yıl gibi bir süre bekletmek gerektiğini ortaya çıkarır. Bazı elektrik makinalarında (ömrünün hemen tümü kısa devre olayıyla geçen transformatörler bu sınıfa girer) bakır ile az miktarda gümüş içeren alaşımların kullanılması bize en uygun çözümü sunar.

SONUÇLAR

Soğuk haddeleme ile bakırın mekanik mukavemetinde bir hayli artış meydana getirmek mümkündür. Belirli bir sıcaklıkta gerektiği kadar bekletilen bakır hızla yumuşayacaktır.

Kısa devre ve aşırı yük durumlarının hesaba katıldığı normal çalışma şartları altında bile; bakır, mekanik mukavemet değerlerinden fazla bir şey kaybetmez.

KAYNAKLAR

- 1- Mark's Standart Handbook for Mechanical Engineers. 8. Edition. Mc Graw Hill Book Company.
- 2- Mechanical properties of sintered copper. Goetzal in Wulf "Powder metallurgy" ASM, 1942.
- 3- "The softening behaviour of cold-worked silver-copper" (Booklet) The Copper Range Company, New York.
- 4- Canada Wire and Gabi* Laboralory Report NO: E-10-72, Part B, ID. MONTGOMERY. March 1972.
- 5- British Non-Ferrous Metals Research Association Confidential. Research Report NO: A1801, J.E. BOWERS, November 1971.
- 6- Noranda Research Centre Internal Report NO: 253, J.C. FARGE, January 1972.