

EUR 433. d

EUROPÄISCHE ATOMGEMEINSCHAFT — EURATOM

**EINFLUSS UNTERSCHIEDLICHER
KALTVERFORMUNGEN AUF DIE
MECHANISCHEN EIGENSCHAFTEN
UND DEN DISPERSIONSGRAD
VON SINTERALUMINIUM**

von

E. G. HESS

1963



ORGEL Programm

**Gemeinsame Kernforschungsstelle
Forschungsanstalt Ispra — Italien
Hauptabteilung Werkstoffe
Metallurgie und Keramik**

**Vortrag gehalten auf der Tagung der «Deutschen Gesellschaft für Metallkunde»,
Berlin, 10. — 13.6.1963**

HINWEIS

Das vorliegende Dokument ist im Rahmen des Forschungsprogramms der Kommission der Europäischen Atomgemeinschaft (EURATOM) ausgearbeitet worden.

Es wird darauf hingewiesen, dass die Euratomkommission, ihre Vertragspartner und alle in deren Namen handelnden Personen :

- 1° — keine Gewähr dafür übernehmen, dass die in diesem Dokument enthaltenen Informationen richtig und vollständig sind oder dass die Verwendung der in diesem Dokument enthaltenen Informationen oder der in diesem Dokument beschriebenen technischen Anordnungen, Methoden und Verfahren nicht gegen gewerbliche Schutzrechte verstößt;
- 2° — keine Haftung für die Schäden übernehmen, die infolge der Verwendung der in diesem Dokument enthaltenen Informationen oder der in diesem Dokument beschriebenen technischen Anordnungen, Methoden oder Verfahren entstehen könnten.

Dieser Bericht wird zum Preise von 40 bfrs. verkauft. Bestellungen sind zu richten an : PRESSES ACADÉMIQUES EUROPÉENNES 98, chaussée de Charleroi, Brüssel 6.

Die Zahlung ist zu leisten durch Überweisung

- an die BANQUE DE LA SOCIÉTÉ GÉNÉRALE (Agence Ma Campagne) — Brüssel — Konto Nr. 964.558;
- an die BELGIAN AMERICAN BANK AND TRUST COMPANY — New York — Konto Nr. 121.86;
- an die LLOYDS BANK (Foreign) Ltd. — 10 Moorgate, London E.C. 2,

als Bezug ist anzugeben : «EUR 433.d — Einfluss unterschiedlicher Kaltverformungen auf die mechanischen Eigenschaften und den Dispersionsgrad von Sinteraluminium».

Gedruckt von CEUTERICK, Löwen,
Brüssel, Dezember 1963

EUR 433. d

INFLUENCE OF VARIOUS COLD-WORKING PROCESSES ON THE MECHANICAL PROPERTIES AND DEGREE OF DISPERSION OF SINTERED ALUMINIUM PRODUCTS by E.G. HESS

European Atomic Energy Community — EURATOM
ORGEL Program

Joint Nuclear Research Center — Ispra Establishment (Italy)

Materials Department — Metallurgy and Ceramics Service

Text presented at the meeting of the «Deutsche Gesellschaft für Metallkunde»,
Berlin, 10. — 13.6.1963

Brussels, December 1963, 14 pages, 7 figures.

As-extruded dispersion-hardened Aluminium (SAP) containing 4 to 14% Al_2O_3 as strengthening phase is cold-worked by drawing, rolling and swaging.

EUR 433. d

INFLUENCE OF VARIOUS COLD-WORKING PROCESSES ON THE MECHANICAL PROPERTIES AND DEGREE OF DISPERSION OF SINTERED ALUMINIUM PRODUCTS by E.G. HESS

European Atomic Energy Community — EURATOM
ORGEL Program

Joint Nuclear Research Center — Ispra Establishment (Italy)

Materials Department — Metallurgy and Ceramics Service

Text presented at the meeting of the «Deutsche Gesellschaft für Metallkunde»,
Berlin, 10. — 13.6.1963

Brussels, December 1963, 14 pages, 7 figures.

As-extruded dispersion-hardened Aluminium (SAP) containing 4 to 14% Al_2O_3 as strengthening phase is cold-worked by drawing, rolling and swaging.

EUR 433. d

INFLUENCE OF VARIOUS COLD-WORKING PROCESSES ON THE MECHANICAL PROPERTIES AND DEGREE OF DISPERSION OF SINTERED ALUMINIUM PRODUCTS by E.G. HESS

European Atomic Energy Community — EURATOM
ORGEL Program

Joint Nuclear Research Center — Ispra Establishment (Italy)

Materials Department — Metallurgy and Ceramics Service

Text presented at the meeting of the «Deutsche Gesellschaft für Metallkunde»,
Berlin, 10. — 13.6.1963

Brussels, December 1963, 14 pages, 7 figures.

As-extruded dispersion-hardened Aluminium (SAP) containing 4 to 14% Al_2O_3 as strengthening phase is cold-worked by drawing, rolling and swaging.

The maximum deformability — limited by the resistance to recrystallisation — and both the influence of cold-work on the dispersion structure and the mechanical properties are investigated.

With increasing cold-work 3 ranges with different deformation mechanisms can be observed :

- work-hardening of the matrix,
- refinement of the banded structure originating from the extrusion,
- considerable dispersion improvement by cracking and distribution of FeAl_3 - inclusions and oxyd-agglomerates in the range of the highest reductions.

The maximum deformability — limited by the resistance to recrystallisation — and both the influence of cold-work on the dispersion structure and the mechanical properties are investigated.

With increasing cold-work 3 ranges with different deformation mechanisms can be observed :

- work-hardening of the matrix,
- refinement of the banded structure originating from the extrusion,
- considerable dispersion improvement by cracking and distribution of FeAl_3 - inclusions and oxyd-agglomerates in the range of the highest reductions.

The maximum deformability — limited by the resistance to recrystallisation — and both the influence of cold-work on the dispersion structure and the mechanical properties are investigated.

With increasing cold-work 3 ranges with different deformation mechanisms can be observed :

- work-hardening of the matrix,
- refinement of the banded structure originating from the extrusion,
- considerable dispersion improvement by cracking and distribution of FeAl_3 - inclusions and oxyd-agglomerates in the range of the highest reductions.

EUR 433. d

EUROPÄISCHE ATOMGEMEINSCHAFT — EURATOM

**EINFLUSS UNTERSCHIEDLICHER
KALTVERFORMUNGEN AUF DIE
MECHANISCHEN EIGENSCHAFTEN
UND DEN DISPERSIONSGRAD
VON SINTERALUMINIUM**

von

E. G. HESS

1963



ORGEL Programm

**Gemeinsame Kernforschungsstelle
Forschungsanstalt Ispra — Italien
Hauptabteilung Werkstoffe
Metallurgie und Keramik**

**Vortrag gehalten auf der Tagung der «Deutschen Gesellschaft für Metallkunde»,
Berlin, 10. — 13.6.1963**

INHALTSVERZEICHNIS

| | Seite |
|------------------------------------|-------|
| 1 — EINLEITUNG | 5 |
| 2 — VERSUCHSDURCHFÜHRUNG | 6 |
| 3 — ERGEBNISSE | 6 |
| 4 — DISKUSSION | 11 |
| LITERATURVERZEICHNIS | 14 |

ABBILDUNGEN

| | Seite |
|---|-------|
| Abb. 1 — Max. Kaltverformungsfähigkeit von SAP | 7 |
| Abb. 2 — Einfluss des Kaltwalzens auf die Raumtemperatur-Eigenschaften von SAP — ISML | 8 |
| Abb. 3 — Einfluss des Ziehens auf die Raumtemperatur-Eigenschaften von SAP-ISML | 8 |
| Abb. 4 — Einfluss des Kaltpilgerns auf die mechanischen Eigenschaften von SAP-ISML- Rohren | 9 |
| Abb. 5 — Einfluss des Rundhämmerns auf die Raumtemperatur-Eigenschaften von SAP-ISML | 10 |
| Abb. 6 — Einfluss des Rundhämmerns auf die Eigenschaften bei 400°C von SAP-ISML | 10 |
| Abb. 7 — Gefüge von SAP-ISML 895 stranggepresst und rundgehämmert | 12 |

EINFLUSS UNTERSCHIEDLICHER KALTVERFORMUNGEN AUF DIE MECHANISCHEN EIGENSCHAFTEN UND DEN DISPERSIONS-GRAD VON SINTERALUMINIUM

ZUSAMMENFASSUNG

Sinteraluminium (SAP) mit 4-14 Gew. % Al_2O_3 als dispersionshärtende Phase wird nach dem Strangpressen durch Ziehen, Walzen und Hämmern kaltverformt. Neben der — durch die Rekristallisationsbehinderung begrenzten — erreichbaren Querschnittsverminderung wird der Einfluß auf das Dispersionsgefüge und die mechanischen Eigenschaften untersucht.

Mit stärker werdender Kaltarbeit werden 3 Verformungsstadien durchlaufen, denen unterschiedliche Mechanismen zugrundeliegen :

Die Verfestigung der Matrix,
die Verfeinerung des vom Strangpressen herrührenden Zeilengefüges und
im Bereich höchster Verformung eine echte Dispersionsverbesserung durch Zerbrechen und Verteilung der zu Mikrorissen Anlaß gebenden Eisenaluminid-Einschlüsse sowie der Oxydagglomerate.

SUMMARY

As-extruded dispersion-hardened Aluminium (SAP) containing 4 to 14% Al_2O_3 as strengthening phase is cold-worked by drawing, rolling and swaging. The maximum deformability — limited by the resistance to recrystallisation — and both the influence of cold-work on the dispersion structure and the mechanical properties are investigated.

With increasing cold-work 3 ranges with different deformation mechanisms can be observed :
work-hardening of the matrix,
refinement of the banded structure originating from the extrusion,
considerable dispersion improvement by cracking and distribution of $FeAl_3$ — inclusions and oxydagglomerates in the range of the highest reductions.

1 — EINLEITUNG

SAP bietet aufgrund seiner im Vergleich zu Aluminiumlegierungen ausgezeichneten Warmfestigkeit sowie geringer Absorption thermischer Neutronen und guter Korrosionseigenschaften Anwendungsmöglichkeiten als Werkstoff in der Kernenergietechnik. Im Rahmen der von EURATOM betriebenen Entwicklung eines organisch gekühlten und schwerwassermoderierten Reaktors, genannt ORGEL, wurde 1960 die mögliche Verwendung von SAP als Canning-Material für eine Arbeitstemperatur von 420°C bis 450°C sowie für Druckrohre (Einsatzbereich etwa 400°C und 20 atm.) ins Auge gefaßt. Seit der Zeit werden im Forschungsinstitut von MONTECATINI (ISML-NOVARA) und im EURATOM-Forschungszentrum in Ispra eine Reihe von Entwicklungsarbeiten durchgeführt. Sie haben zum Ziel, dem Reaktorprojekt ein für dessen spezielle Erfordernisse geeignetes Sinteraluminium mit reproduzierbaren physikalischen, mechanischen und Korrosionseigenschaften im wesentlichen in Form von Präzisionsrohren zur Verfügung stellen. Das Letztere beinhaltet demnach auch die Beherrschung der entsprechenden Fertigungstechnik für die hohen Ansprüche des Reaktorbaues.

Trotz bemerkenswerter Fortschritte auf dem Gebiet der Pulverherstellung und Verarbeitung in Richtung verbesserter und gering streuender Eigenschaften lassen die erzielten Ergebnisse im Hinblick auf die Erfordernisse der Brennelement- und Kanalkonstruktion im wesentlichen noch folgende Schwierigkeiten erkennen :

1. Die Sprödigkeit des Werkstoffes bei der vorgesehenen Einsatztemperatur, u.a. gegeben durch geringe Bruchdehnungen sowie Gleichmaß- und Zeitdehnwerte von unter 1%. Das zwingt zur Konzeption z.B. besonders abgestützter oder selbsttragender Brenn-

elementstrukturen, bei denen eine plastische Verformung unter Reaktorbedingungen praktisch nicht akzeptiert werden kann.

2. Die immer noch beträchtliche Streuung der mechanischen Eigenschaften aufgrund ungleichmäßiger Dispersion des Oxyds in der Aluminium-Matrix sowie die Kerbwirkung von weiteren heterogenen Komponenten, insbesondere FeAl_3 , deren Partikelgröße vielfach das Zehnfache der Oxydteilchen beträgt.
3. Die Fehlermöglichkeiten bei der Fabrikation infolge der Vielzahl der notwendigen Arbeitsgänge und die begrenzte Kaltverformungsfähigkeit ohne vollständige Erholungsmöglichkeit durch Wärmebehandlung, wichtig für die Herstellung von Präzisionsrohren.

Zahlreiche Bestrebungen sind im Gange, von verschiedenen Seiten her die Eigenschaften des durch Oxyd dispersionsgehärteten Aluminiums zu verbessern, z.B. durch Einsatz anderer Pulversorten und Oxydationsmethoden oder durch neue Verfahren mit homogenerem Ausgangsmaterial zur Erzielung günstigerer Dispersionsgefüge.

Die Erfahrung zeigt, daß selbst nach mehrfacher Warmarbeit durch Stauchen und Strangpressen ein merklicher Einfluß der — im Vergleich zur Ausscheidungshärtung oder Sinterung mit Diffusion — rohen Herstellungsmethode verbleibt. Die resultierende starke Heterogenität im stranggepreßten Zustand sowie die Forderung nach einer Herstellungstechnik für präzises Halbzeug legen eine intensive Beschäftigung mit der Kaltverformung von SAP nahe.

Wenn auch auf Grund der Rekristallisationsbehinderung nur in beschränktem Maße durchführbar, so sollte doch durch Kaltarbeit ein Einfluß auf die Eigenschaften zu nehmen sein, zumal eine Verfestigung der Matrix und gewisse Änderungen der Dispersionsmorphologie erwartet werden können. Unter diesem Aspekt wurde eine Untersuchung über das Formänderungsvermögen von SAP sowie den Einfluß verschiedener Kaltverformungen in Angriff genommen, über deren erste Ergebnisse im Folgenden berichtet wird.

2 — VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

Als Ausgangsmaterial kommen SAP-Pulver von der AIAG ¹⁾ zur Verwendung, die jedoch nach dem vom ISML zuerst angewandten Verfahren ^{2 3)} im kaltgepreßten Zustand bei 600° vakuumbehandelt, anschließend heißgestaucht und — bis auf die zum Kaltpilgern verwendeten Luppen — zweimal stranggepreßt werden. Als Ausgangsformen für die Kaltarbeit werden verwendet : Platinen zum Walzen, Stangen und Rohre zum Ziehen und Rundhämmern sowie Preßluppen zum Kaltpilgern. Die Ermittlung der mechanischen Eigenschaften erfolgt an zylindrischen, bzw. rohrförmigen Proben.

3 — ERGEBNISSE

Als globales Ergebnis ist in der Abb. 1 die maximale Kaltverformungsfähigkeit der 3 interessierenden SAP-Sorten bei unterschiedlichen Verformungsarten dargestellt. Es sind dies technologisch einwandfrei ohne Rißbildung oder Brüche erreichbare Werte.

Deutlich wird die begrenzte Durchführbarkeit des Ziehens, gegeben durch das überwiegende Vorhandensein von Längsspannungen bei der Verformung. Infolge der Rekristallisationsbehinderung ist die Wiederherstellung des ursprünglichen Formänderungsvermögens durch eine normale Wärmebehandlung nicht möglich und die Gesamterhöhung — wie am Beispiel des Ziehens und Walzens gezeigt — nur etwa 10% bei SAP 930.

Sind etwa 5 Züge, bzw. 10 Walzstiche mit jeweils nach 10% Querschnittsverminderung durchgeführten Glühungen zur Erreichung der maximalen Verformung erforderlich, so können

mit dem Kaltpilgerverfahren in einem Durchgang bedeutend höhere Werte erzielt werden. Im Gegensatz zum Ziehen wird beim Kaltpilgern die Verformung vorwiegend durch Tangentialspannungen ausgelöst und damit das Formänderungsvermögen beträchtlich erhöht. Für den Fall hoher Kaltverformungen von SAP-Rohren kommt das Kaltpilgern als einziges ökonomisches Verfahren in Frage, wobei die fast 50%-ige Verminderung der Exzentrizität von Strangpreßfluppen im normalen Verformungsbereich als weiteres Positivum ins Gewicht fällt.

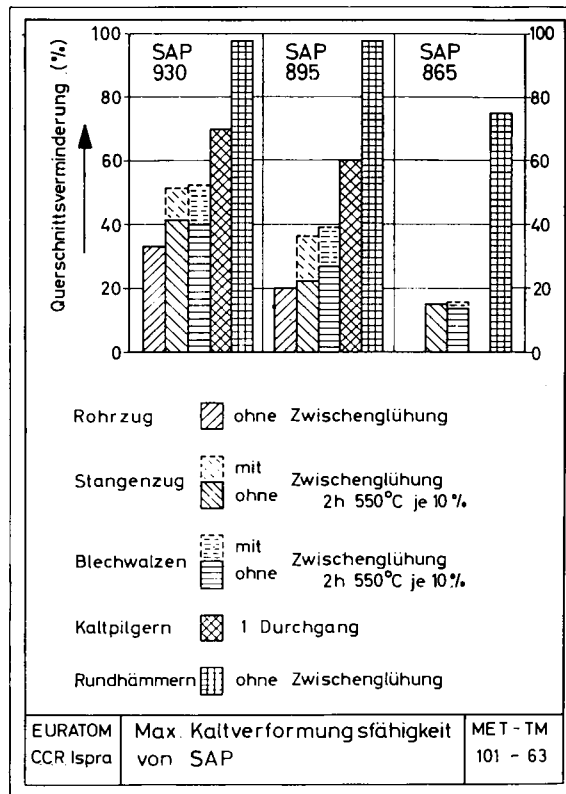


Abb. 1

Ein spezieller Fall liegt beim Rundhämmern vor, das z.B. in 8 Stichen bis 97,5% Querschnittsverminderung bei SAP 930 und 895 ohne Erschöpfung des Formänderungsvermögens und ohne Zwischenglühung durchführbar ist. Unter gleichen Umständen und Bedingungen läßt sich SAP 865 bis über 70% verformen. Wie noch gezeigt wird, scheint hier eine adiabatische Verformung mit einer gleichzeitig ablaufenden Erholung vorzuliegen.

Grundsätzlich kann auch für SAP, jedoch ausgeprägter als für andere metallische Werkstoffe, die Tatsache bestätigt werden, daß bei Kaltverformungsarten mit vorwiegenden Kompressions- und Tangentialspannungen sowie hohen Verformungsgeschwindigkeiten das Formänderungsvermögen beträchtlich erhöht ist.

Der Abstand der Oxydpartikel, bei gleicher Teilchengröße proportional dem Volumenanteil an disperser Phase, beeinflußt deutlich erkennbar die Höhe der möglichen Kaltarbeit, die mit steigendem Al_2O_3 -Gehalt entsprechend geringer wird.

Das Verhalten der mechanischen Eigenschaften mit steigendem Kaltverformungsgrad sowie der Einfluß von Zwischenglühungen ist für die wichtigsten Umformungsverfahren in den folgenden Abbildungen dargestellt.

Abb. 2 zeigt den Einfluß des Kaltwalzens vor und nach einer bei jeweils 10% Querschnittsverminderung durchgeführten Glühung. Mit steigendem Oxydgehalt stärker ausgeprägt, werden

bereits nach etwa 25% Verformung höchste Festigkeitswerte und Mindestdehnungen erreicht, die praktisch bis zur Erschöpfung des Formänderungsvermögens unverändert bleiben. Die Dehngrenze durchläuft wie auch nach dem Ziehen und Hämmern lediglich ein leichtes Maximum.

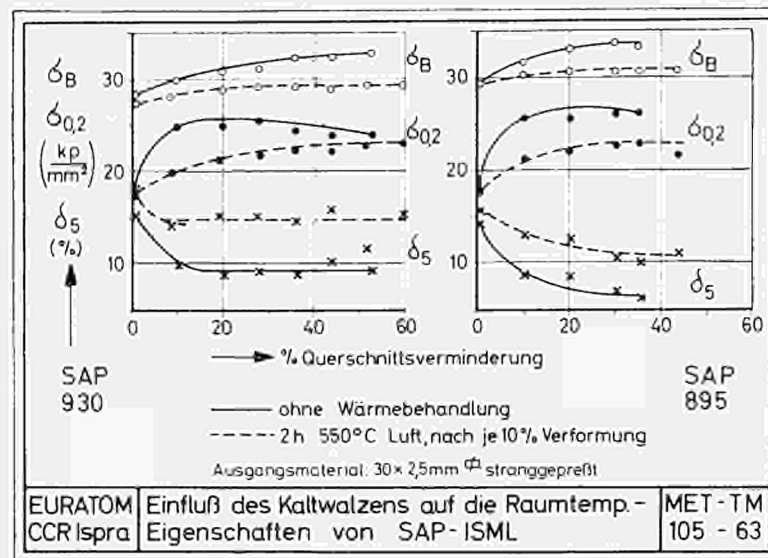


Abb. 2

Abb. 3 zeigt sehr ähnliche Werte für den Fall des Stangenziehens. Typisch für SAP und gültig für alle Kaltverformungsverfahren äussert sich der starke Dehnungsabfall nicht — wie z.B. bei Einphasenlegierungen — in einer geringer werdenden Differenz zwischen Zerreißfestigkeit und 0,2-Dehngrenze.

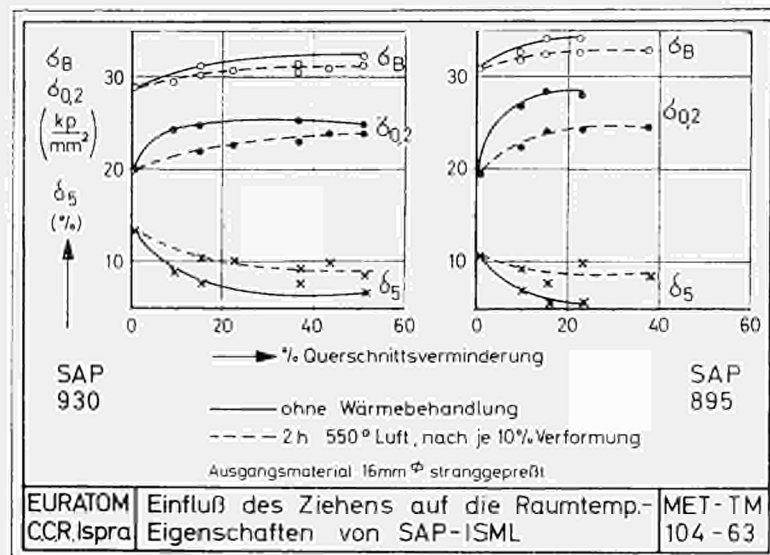


Abb. 3

Der Einfluß der zahlreichen Wärmebehandlungen — nach dem Walzen etwas ausgeprägter als nach dem Ziehen — ist nur in dieser Höhe durch jeweiliges Zwischenglühen nach geringen Verformungsgraden zu erzielen. Rekristallisation findet unter diesen Bedingungen nicht statt, sondern lediglich ein geringes Kornwachstum.

Die geringe Änderung der mechanischen Eigenschaften im Bereich von etwa 30 bis 70% Querschnittsverminderung zeigt sich auch beim Kaltpilgern. Die oberen Diagramme der Abb. 4 geben den Verlauf der Raumtemperatureigenschaften wiederum für SAP 930 und 895 vor und nach einer Zwischenglühung wieder. Die — gestrichelt angedeutete — Zuordnung der Werte

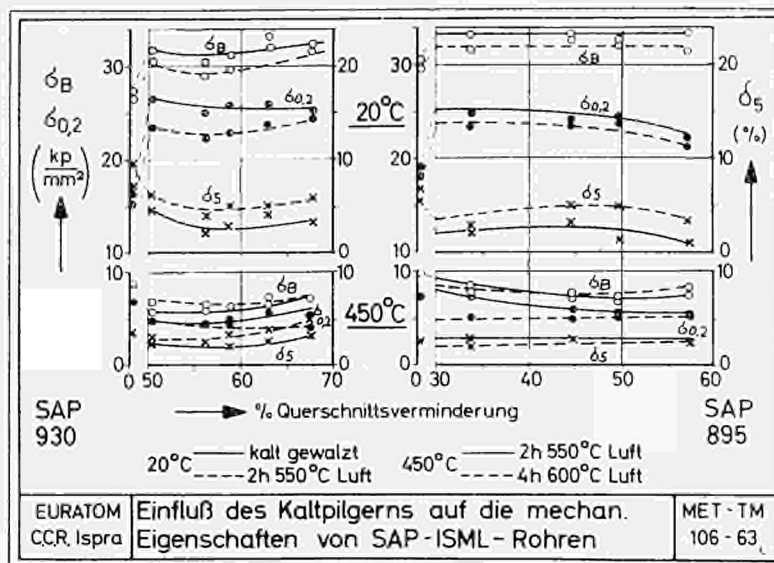


Abb. 4

des stranggepreßten Zustandes läßt hier ebenfalls den bereits beschriebenen Anstieg der Dehngrenze bei geringen Verformungen vermuten. Auch bei stärkerer Kaltarbeit — jeweils in einem Pilgerschritt aufgebracht — ist keine weitere Verfestigung festzustellen.

Der Einfluß einer Wärmebehandlung nach derartigen hohen Verformungsgraden ist deutlich geringer geworden. Die mechanischen Eigenschaften bei 450°C, dargestellt in den unteren Diagrammen, werden durch die Pilgerverformung — auch nach einer Wärmebehandlung 4 h bei 600°C — nur geringfügig in Richtung geringerer Festigkeit und höherer Dehnung verändert. Der bei Raumtemperatur festgestellte Anstieg der Dehngrenze ist nicht mehr vorhanden, dagegen eine leichte Erhöhung aller 3 Eigenschaften im Bereich höchster Verformung.

Die an SAP ohne Schwierigkeiten durchführbare Rundhämmerstechnik gestattet die Betrachtung des gesamten Verformungsbereiches. Die Raumtemperatureigenschaften der 4 bekannten SAP-Sorten zeigt Abb. 5. Deutlich wird die gegenüber den anderen Verfahren geringere Erhöhung der Dehngrenze im ersten Bereich bis etwa 30%. Mit zunehmendem Volumenanteil an disperser Phase wird auch hier der Dehngrenzanstieg steiler, während die Zerreißfestigkeit konstant bleibt.

Der anschließende Verformungsbereich ist analog den anderen Verfahren durch geringe Veränderungen der mechanischen Eigenschaften gekennzeichnet.

Nach einem wenig ausgeprägten Maximum der 0,2-Dehngrenze mit Mindestdehnungen ist im Bereich höchster Querschnittsvermindierungen um 80% ein merklicher Anstieg aller 3 Eigenschaften über die Werte des stranggepreßten Ausgangszustandes festzustellen. Auch andere Meßwerte zeigen hier einen Wechsel im plastischen Verhalten an. Für die Erhöhung der Dehnung ist lediglich die Gleichmaßdehnung verantwortlich, die im geringen Verformungsbereich stark abfällt, dann praktisch unverändert bleibt, um hier auf etwa den doppelten Wert anzusteigen. Außerdem fällt bei der Dimensionsbestimmung auf, daß die bis dahin positive Abweichung des Durchmessers der gehämmerten Proben von dem des Werkzeugs zwischen 80 und 90% Verformung bis zu 10% negativ wird.

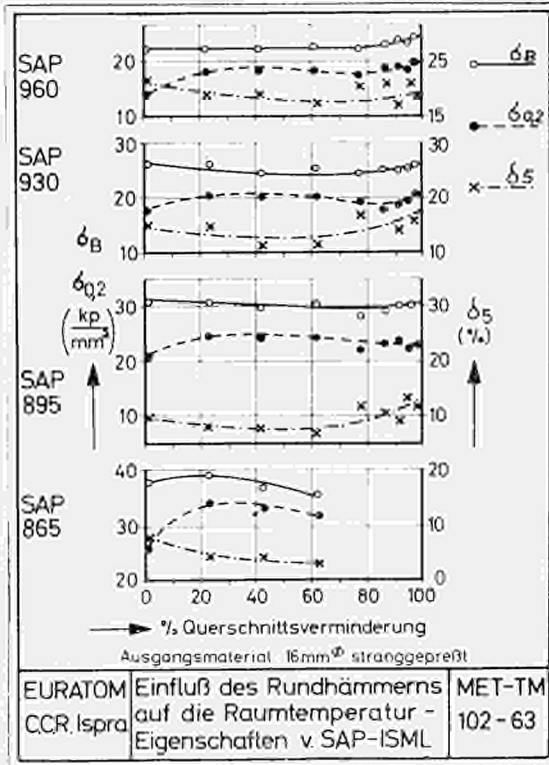


Abb. 5

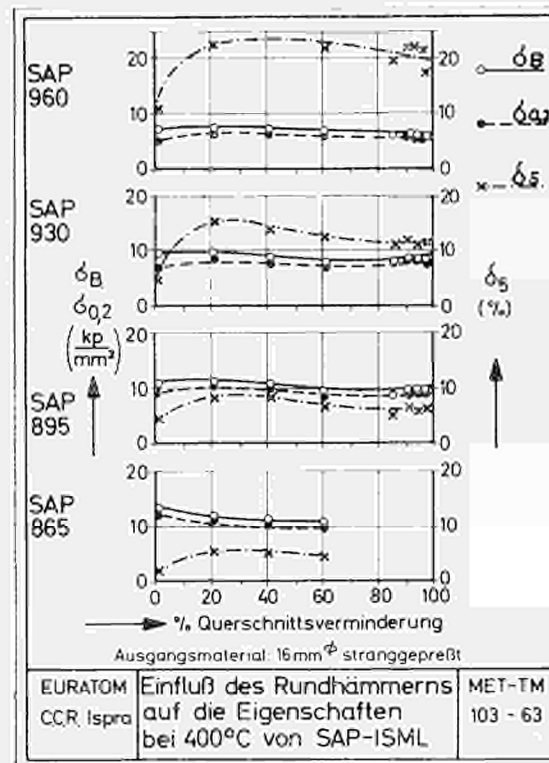


Abb. 6

Bei 400°C zeigt das gehämmerte SAP ein unerwartetes Bruchverhalten, wie aus Abb. 6 hervorgeht. Bei in allen Verformungsbereichen praktisch unveränderten Festigkeitswerten verdoppelt sich die Bruchdehnung bereits nach geringen Querschnittsverminderungen.

Wenn auch mit stärkerer Kaltarbeit ein leichter Abfall zu vermerken ist, so bleibt die Bruchdehnung selbst nach 95% Verformung auf — im Vergleich zum stranggepreßten Zustand — beträchtlich höheren Werten. Aus den aufgenommenen Spannungs-Dehnungsdiagrammen geht klar hervor, daß die Resultate ausschließlich auf die stärkere Einschnürung zurückzuführen sind.

Wärmebehandlungen zwischen 2 h 500°C und 16 h 600°C ergaben — abgesehen von einer Verringerung der Gleichmaßdehnung — keine merkliche Veränderung der mechanischen Eigenschaften sowohl bei Raum- als auch bei höherer Temperatur.

4 — DISKUSSION

Nach diesen Ergebnissen an technologisch hergestelltem SAP, dessen von beträchtlichen Zufälligkeiten beeinflussbare Vorgeschichte sich noch im Fertigprodukt durch merkliche Unterschiede in der Verteilung von Matrix und disperser Phase manifestiert, wäre es ein Unterfangen, eine allgemeingültige Deutung des Kaltverformungsmechanismus zu versuchen. Wenn trotzdem mit einigen charakteristischen Verhaltensweisen theoretische Vorstellungen verknüpft werden, dann lediglich unter dem Aspekt einer Hypothese für weitere, vor allem Dingen elektronenmikroskopische Untersuchungen.

Bei der Betrachtung des Verlaufs der mechanischen Eigenschaften mit zunehmender Kaltarbeit lassen sich 3 je nach Gehalt an disperser Phase und Verformungsmethode mehr oder weniger ausgeprägte Verformungsstadien feststellen, denen verschiedene Mechanismen zugrunde liegen könnten :

- Ein erster Bereich bis zu etwa 30% Querschnittsverminderung, gekennzeichnet durch den starken Anstieg der Festigkeitswerte bei Raumtemperatur.
- Ein zweiter Verformungsbereich bis etwa 80% Querschnittsverminderung mit nur geringen Schwankungen der Raum- und Hochtemperatureigenschaften.
- Ein dritter Bereich höchster Verformungen, nach Kaltpilgern bei etwa 65% bereits einsetzend, mit geringem Anstieg aller 3 Raumtemperatureigenschaften.

Metallographische Untersuchungen sowie quantitative Bestimmungen der Anzahl und Größe von Einschlüssen (z.B. FeAl_3) mit dem Mikroanalysator ⁴⁾ deuten ebenfalls auf das Vorhandensein dieser Stadien hin.

Abb. 7 zeigt beispielsweise die Gefüge von SAP 895 nach Strangpressen und 97%-igem Rundhämmern. Der mittlere Verformungsbereich ist nicht dargestellt, da metallographisch keine merklichen Unterschiede zum Ausgangszustand festzustellen sind. Deutlich sichtbar ist die uneinheitliche Zeilenstruktur des stranggepreßten Zustandes mit ausgedehnten, nicht eingeformten Matrixbereichen. Beim stark verformten Gefüge rechts ist diese Diskontinuität der Dispersion durch die Knetarbeit verschwunden und eine statistische Verteilung erreicht.

Das für alle Verformungsarten charakteristische Verhalten im ersten Bereich kann nach vorliegenden Ergebnissen mit einer Kaltverfestigung der Matrix erklärt werden. Die Fließgrenze des Materials wird lediglich von der Höhe der durch Kaltarbeit zusätzlich gespeicherten Energie bestimmt ⁵⁾. Zusätzliche Energie deshalb, da dem stranggepreßten Zustand der $\text{Al-Al}_2\text{O}_3$ -Dispersion bereits das einer beträchtlichen Kaltverformung äquivalente Energieniveau zukommt ⁶⁾. Die größere Versetzungsdichte bewirkt dabei eine Erhöhung der zur weiteren Bildung von Versetzungen notwendigen Spannung über diejenige, die zur Versetzungswanderung erforderlich ist. Diese Anzeichen einer nicht idealen Dispersion kommen auch durch den merklichen Einfluß einer Wärmebehandlung zum Ausdruck.

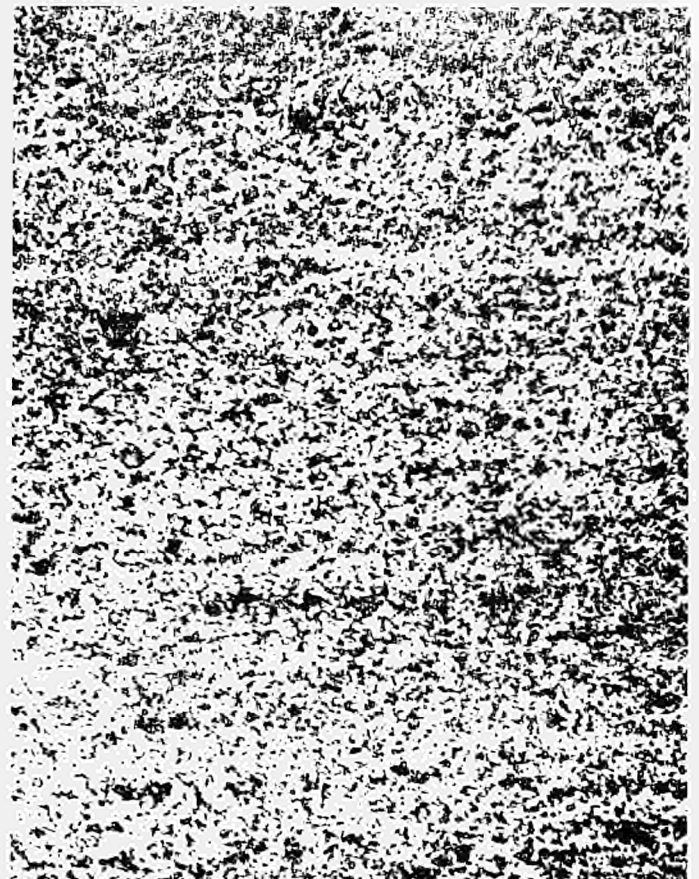
Infolge der geringen Verfestigung und der Unwirksamkeit einer technologischen Wärmebehandlung kann das Rundhämmern nicht als reine Kaltverformung aufgefaßt werden. Die hohen spezifischen Druck-Wechselspannungen im Werkstoff und die sehr hohe Verformungsgeschwindigkeit scheinen hier einen örtlich beträchtlichen Temperaturanstieg und damit eine gleichzeitige Erholung der Matrix zu bewirken.

Die Warmfestigkeit des SAP bei 400° bis 450°C im ersten Verformungsbereich wird nicht verändert, da die kaltverfestigte Matrix ein gewisses Erholungsvermögen besitzt. Einem durch Homogenisierung des Gefüges verständlichen leichten Dehnungsanstieg beim Pilgern steht — wie bereits erwähnt — eine sehr starke Erhöhung beim Hämmern gegenüber. Da diese sich nur auf die Einschnürung auswirkt, liegt es nahe, das Verhalten mit der den Bruch einleitenden Bildung von Mikrorissen in Beziehung zu bringen. Eine Verteilung oder Auflösung von Oxyd- und FeAl₃-Agglomeraten kommt anscheinend als Ursache nicht in Frage, da in diesem Verformungsbereich weder metallographisch noch durch «Scanning» mit dem Mikroanalysator ein derartiger Vorgang nachgewiesen werden konnte. Bei gleicher Partikelgröße jedoch kann die Verzögerung des Auftretens von Mikrorissen nur mit einem Spannungsabbau an der Grenzfläche Matrix disperse Phase, d.h. weniger Stapelversetzungen erklärt werden. Das müßte jedoch — falls sich ein Teil der Versetzungen infolge ihrer Richtung nicht gegenseitig aufhebt — zu einer Erniedrigung der Festigkeitswerte führen.

Der zweite Verformungsbereich scheint lediglich durch die mit steigendem Oxydgehalt früher einsetzende Verfeinerung des Zellengefüges charakterisiert zu sein. Da sich hier weder



a



b

Abb. 7 — Gefüge von SAP-ISML 895 nach a) Strangpressen und b) 97% iger Verformung durch Rundhämmern. Elektrolytisch poliert nach Jacquet. Längsschliff; 1000 x

der Partikelabstand noch die Größe merklich ändern sowie Matrix und Aluminiumzeilen bereits kaltverfestigt sind, liegt kein Grund für größere Eigenschaftsänderungen vor.

Der dritte Bereich höchster Verformung mit dem beim Pilgern und Hämmern beobachteten Anstieg von Festigkeit und Dehnung bei Raumtemperatur deutet auf das Vorhandensein eines neuen Mechanismus. Wie bereits erwähnt, wird der vorher zeilenförmige Matrixanteil unter der Knetwirkung der starken Kaltarbeit vollständig eingeformt. Die infolge ihrer Größe vorwiegend für die Mikrorißbildung verantwortlichen Eisenaluminide wie FeAl_3 brechen auf und verteilen sich, wie quantitativ nachgewiesen werden konnte ¹⁾. Ein ähnlicher Vorgang kann für die Oxydagglomerate angenommen werden.

Neben der Homogenisierung scheint in diesem Verformungsbereich eine echte Dispersionsverfeinerung vorzuliegen. Die Festigkeitswerte steigen und die Erhöhung der Gleichmassdehnung am Beginn dieses Stadiums könnte durch örtliches Passieren von Versetzungen mit dem Abbau Spannungsspitzen gedeutet werden. Die geringere Wirksamkeit von technologischen Wärmebehandlungen in diesem Bereich kann damit ebenfalls verständlich gemacht werden.

Zum vertieften Verständnis des Kaltverformungsmechanismus von SAP sind noch eine Reihe von Untersuchungen, insbesondere elektronenmikroskopische Studien erforderlich. Darüberhinaus werden von den laufenden Arbeiten über die Rekristallisation weitere Aufschlüsse und Ansatzpunkte für eine Materialverbesserung in Richtung höherer Warmduktilität erwartet. Anschließend ist zu hoffen, daß trotz gewisser, bei der Verformung auftretender Änderungen der Dispersionsmorphologie die theoretischen Ansätze von Orowan ⁷⁾ sowie Lenel und Ansell ⁵⁾ auch auf das Gebiet der Kaltverformung dispersionsgehärteter Legierungen angewendet und erweitert werden können.

LITERATURVERZEICHNIS

1. BLOCH, E. A. — *Met. Reviews VI* (1961) 193.
2. MONTECATINI (ISML). — Patentanmeldung Nr. 13.532 vom 30.5.1961.
3. GUALANDI, D. und P. JEHENSON. — *La metallurgia italiana LIV* (1962) 291.
4. THEISEN, R. — Veröffentlichung vorgesehen in Zeitschrift für Metallkunde.
5. LENEL, P. V. und ANSELL, G. S. *Powder Metallurgy*, Interscience Publishers, New York — London, 1961, 267.
6. GRANT, N. J. und PRESTON, O. — *Trans. AIME* 209 (1957) 349.
7. OROWAN, E. — «Dislocations in metals», *Am. Inst. Min. Met. Eng.*, New York, 1954.

Herrn Prof. Gualandi vom ISML-Novara sei an dieser Stelle für wirksame Unterstützung der Arbeit und den Herren Bonnet und Boermann vom C.C.R.-Ispra für die Durchführung der Zerreißversuche gedankt.

CDNA00433DEC