

HERSTELLUNG VON HOCHWERTIGEN BÄNDERN UND BLECHEN AUS ALUMINIUMWERKSTOFFEN

Received - Primljeno: 2005-10-23
Accepted - Prihvaćeno: 2006-03-28
Review Paper - Pregledni rad

Die Aluminiumproduktion ist weltweit in den letzten Jahren angewachsen. Für Deutschland ist ein besonders starker Anstieg des Sekundäraluminiumanteils charakteristisch. Mehrere Betriebe mussten die energieaufwändigere Primäraluminiumherstellung aufgeben bzw. auslagern. Dieser Trend hält an. Der Datenüberblick über Produktion und Verbrauch an Al beleuchtet die gegenwärtige Situation. Er wird ergänzt durch technische Angaben der Herstellung von Bändern in den Fertigungsstufen des Warm- und Kaltwalzens sowie der Wärmebehandlung. Die Versuchsanlagen zur experimentellen Simulation des Institutes als Voraussetzung für Aufstellung von Fortschrittstechnologien und die mathematische Modellierung werden beschrieben. Ergänzend werden ausgewählte Untersuchungsergebnisse mitgeteilt.

Schlüsselworte: *Al-Produktion, warmwalzen, kaltwalzen, werkstoffeigenschaften*

Production of highquality bands and sheets from aluminium alloys. In last years a aluminium production has increased worldwide. For Germany a specially high increase of used Al is characteristic. Many works had to abandon more power spendin primary aluminium production of bands i.e. they had to outhouse it. This trend still continues. A data overview of production and consumption of Al illuminates present situation. The overview is fulfilled through technical data of production of bands in hot and cold rolling mills as well as heat treating shops. In the paper the best plants for experimental simulation are described as an assumption for the setting of up-to-date technology and mathematical modelling. Additionally selected investigation results are presented.

Key words: *Al - production, hot rolling, cold rolling, properties of material*

Proizvodnja visokokvalitetnih traka i limova iz aluminijских legura. Zadnjih godina je proizvodnja aluminija porasla u cijelom svijetu. Za Njemačku je karakterističan naročito jak porast udjela sekundarnog aluminija. Više pogona moralo je napustiti primarnu proizvodnju aluminija. Taj trend je još uvijek u tijeku. Pregled podataka o proizvodnji i potrošnji osvjetljava sadašnju situaciju. Dopunjava se tehničkim podacima proizvodnje traka u završnoj fazi toplog i hladnog valjanja kao i toplinske obrade. Opisana su ispitna postrojenja za eksperimentalno simuliranje u institutu kao pretpostavka za postavljanje napredne tehnologije i matematičkog modeliranja. Rad je upotpunjen odabranim rezultatima ispitivanja.

Кljučне riječi: *proizvodnja aluminija, toplo valjanje, hladno valjanje, svojstva materijala*

EINLEITUNG

Aluminium und Aluminiumlegierungen sind aufgrund ihrer relativ geringen Dichte und günstigen mechanischen Eigenschaften einerseits etablierte Leichtbauwerkstoffe. Andererseits erweisen sie sich wegen ihrer Umformbarkeit, elektrischen und thermischen Leitfähigkeit, Korrosionsbeständigkeit, Recyclebarkeit und Gesundheitsverträglich-

keit in vielen Industriezweigen als nützlich und unentbehrlich. Ihr Einsatzbereich ist sehr breit gefächert und vielfältig. Entsprechend dem allgemeinen technischen Fortschritt haben sich die Anforderungen an die Menge, Art und Qualität der Al-Erzeugnisse geändert und bemerkenswert verschärft. Wie alle anderen Herstellungsverfahren haben auch die Bandwalztechniken und -technologien permanent einen Wandel erfahren. Sie sind besonders in der jüngsten Vergangenheit auf ein relativ hohes anspruchsvolles Niveau gestellt worden. Im Vordergrund aktueller Forschungs- und Entwicklungsvorhaben stehen vor allem Maßnahmen, die

W. Lehnert, R. Kawalla, D. Hübgen, TU Bergakademie Freiberg, Germany

die Wettbewerbsfähigkeit der Walzwerke bei zunehmender Globalisierung der Wirtschaft gewährleisten und für einen längeren Zeitabschnitt sichern. Weltweit wird den Entwicklungszielen absolute Priorität eingeräumt werden, die zur Vereinfachung der Produktion, zur Erhöhung der Produktivität und der Flexibilität sowie zur Erzielung einer hohen Produktqualität führen.

Die Industrieunternehmen führender Industrieländer sind gehalten, ständig mit neuen Technologieinnovationen, Qualitätsverbesserungen und Produktneuheiten aufzuwarten. Der Forschung obliegt es, die Herstellungs-, Umform- und Verarbeitungsprozesse wissenschaftlich stärker in Form von fundierten Analysen über die Temperatur-, Spannungs- und Formänderungsverhältnisse, den Werkstofffluss, die Gefügebildungsvorgänge sowie zu den Änderungen in der Oberflächenfeingestalt und den Eigenschaftspotenzialen der Finalprodukte zu durchdringen. Die mathematische Modellierung und Simulation der Technologien hat sich in diesem Feld als leistungsfähiges Instrument etabliert.

Der Bericht gibt einen Überblick über moderne Technologien der Band- und Blechherstellung. Wesentliche Bausteine der Prozessrouten werden werkstoff- und umformtechnisch bewertet. In diesem Kontext werden Arbeiten des Institutes für Metallformung zur mathematischen und experimentellen Simulation verdeutlicht.

WACHSTUM UND STRUKTUR DER Al - PRODUKTION

Aluminium ist vor 150 Jahren in die Industrie eingeführt worden. Seitdem hat die Al - Erzeugung, abgesehen von Kriegszeiten, einen stetigen Aufschwung genommen und rangiert nach Stahl an zweiter Stelle der am häufigsten verwendeten Metalle. Die dynamische Entwicklung ist auch in den letzten Jahren nicht abgebrochen (Tabelle 1. u. 2). Dies sind ein untrügliches Zeichen und eine Folge

Tabelle 1. Entwicklung der Al-Erzeugung in der Welt / (kt/a)
 Tablica 1. Razvitak proizvodnje aluminija u svijetu / (kt/god.)

Jahr	Afrika	Nord Amerika	Latein Amerika	Asien	West Europa	Ost- und Mittel europa	Ozeanien	Gesamt
1998	1043	6086	2075	1843	3549	3419	1934	19949
2002	1402	6401	2303	2600	3890	3902	2302	22800

der legierungs- und umformtechnischen Einstellbarkeit einzigartiger, dem Verwendungszweck angepasster Eigenschaftskombinationen und der daraus resultierenden vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten des Aluminiums. Die mittlere Zuwachsrate betrug in dem betrachteten Zeitraum trotz der rezessiven Wirtschaftslage immerhin 3,4

%/a (Produktionsindex 1,034). Sie ist in den Folgejahren nicht geringer geworden. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Wirtschaftsräumen machen die zunehmende Verlagerung der Produktionsschwerpunkte deutlich, die nicht nur die Primäraluminiumerzeugung betreffen.

Für Deutschland ist eine geringfügig höhere Zuwachsrate zu verzeichnen (Tabelle 2.). Jedoch ist zu vermerken,

Tabelle 2. Al-Aufkommen in Deutschland
 Tablica 2. Al-očevid za Njemačku

Jahr	Gesamtprod kt	Primär-Al		Sekundär-Al	
		kt	%	kt	%
1993	949,1	551,9	61,7	397,2	38,3
1998	1100,7	603,2	54,8	497,5	45,2
2003	1338,7	660,8	49,4	677,9	50,6

dass das Eigenaufkommen nicht einmal zur Deckung des Bedarfs an Halbzeug ausreicht und die Herstellung von Sekundäraluminium anteilmäßig erstmalig über 50 % ausmacht [1]. Die Umorientierung ist teilweise auf die Energiesituation zurückzuführen. Die Produktion von Sekundäraluminium auf der Basis recycelter Schrotte ist bei weitem nicht so energieintensiv. Der durchschnittliche Energieeinsatz mit etwa 22 GJ/t ist um 95 % geringer als bei der Primäraluminiumgewinnung [2]. Das ist ein wesentlicher Faktor, der für eine verstärkte Verwendung von Schrott als Ausgangsmaterial spricht, zumal für die Weiterverarbeitung bis zum Fertigprodukt ein weiterer Energiebetrag von 1,5 bis 2,5 GJ/t aufgebracht werden muss. Die drastische Verteuerung der Energie in der letzten Zeit lässt befürchten, dass es zu weiteren Produktionsauslagerungen bzw. Betriebsschließungen kommt.

Soweit auf keinen sortenreinen Neuschrott aus dem internen Produktionsablauf zurückgegriffen werden kann, schließt sich das Recycling von Altmaterialien für die Herstellung von Knetlegierungen an. Sie bleibt dann nur der Gussproduktion vorbehalten. Für die naturharten und ebenso aushärtbaren Al- Legierungen ist die Einhaltung von Grenzwerten für die Begleit- und Spurenelemente nicht nur außerordentlich wichtig, sondern eine Vorbedingung. Begleit- und Spurenelemente, das sind insbesondere V, Zr, Ti, Cr, Ni und Ca, wie auch Fe, Mn, Mg, Cu beeinflussen das

Tabelle 3. Al-Verbrauch und Produktion in Deutschland
 Tablica 3. Al-potrošnja i proizvodnja u Njemačkoj

Jahr	Gesamt kt	Guss		Halbzeug		Walzprodukte	
		kt	%	kt	%	kt	% v. Halbz.
1993	1918	475	24,8	1332	69,4	995	74,7
1998	2437	607	24,9	1820	74,7	1380	75,8
2003	2950	799	27,1	2151	72,9	1645	76,5

Umform- und Beanspruchungsverhalten negativ, soweit sie sich nicht gegenseitig kompensieren oder als Legierungselement verwendet werden. Gleichgültig, ob sie in gelöster oder ausgeschiedener Form vorliegen, wird durch sie die Gefügebildung bei der Umformung signifikant verändert. Tabelle 3. widerspiegelt, dass sich das Verhältnis zwischen den Mengen, die als Formguss und Halbzeug hergestellt wurden, nicht gravierend verändert hat. Auch der Anteil der Walzprodukte am Halbzeugbedarf ist mit ~ 75 % annähernd konstant geblieben. Der größte Teil entfällt auf Bänder und Bleche. In Bild 1. sind die Einsatzbereiche der Al-Werkstoffe, gegliedert nach den einzelnen Industriezweigen, für das Jahr 2003 dargestellt. Traditionell sind der Verkehrssektor und das Bauwesen die dominierenden Einsatzbereiche, wobei für letzteren im Gegensatz zur Automobilindustrie ein Rückgang zu verzeichnen ist. Die Automobilindustrie entwickelt sich zunehmend zu einem wichtigen Einsatzgebiet. Während der Verbrauch an Al im PKW- Bau 1993 etwa bei 58 kg/Einheit betrug, ist inzwischen im Durchschnitt auf 106,5 kg/Einheit, beim Rolls Royce sogar auf < 190 kg/Einheit, gestiegen.

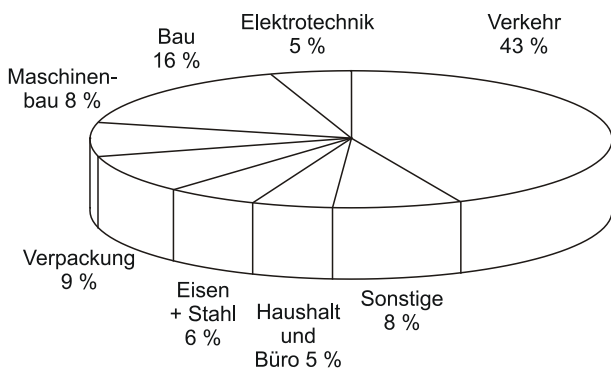


Bild 1. Einsatzgebiete von Al-Werkstoffen in Deutschland [1, 14]
Slika 1. Područja primjene aluminijških legura u Njemačkoj [1, 14]

Parallel mit der Steigerung des Al-Einsatzes hat sich eine Veränderung in der Sortimentsstruktur zu Gunsten des Blecheinsatzes herausgebildet. Der Anteil an Blechen in den Al - Legierungen der AA 5xxx Reihe (Al Mg3; Al Mg4,5Mn0,4) für den Innenbereich sowie der aushärtbaren Legierungen der AA 6xxx Reihe (Al Mg0,4Si1,2; Al MgSi; Al Mg0,7Si) für den Außenbereich der PKW's hat sich von 6 auf 24 % der Gesamtmasse erhöht.

VERFAHRENSWEGE DER WARBANDPRODUKTION

In Bild 2. sind gebräuchliche Technologien der Herstellung von Warmband mit einer Dicke von > 2 mm und einer Breite bis zu 2300 mm dargestellt [2 - 4], die mehr als 55 % der gesamten Al- Produktion repräsentieren. In Abhängigkeit von den verschiedenen Abkühlungs- und

Erstarrungsgeschwindigkeiten unterscheiden sich die entstehenden Gussgefüge merkbar. Mit schneller ablaufender Erstarrung erhöht sich einerseits die Übersättigung der Mischkristalle mit Legierungs- und Begleitelementen. Andererseits werden Größe und Abstand der Dendriten stark verringert, und es erhöht sich die Zahl der Versetzungen, Cluster und Leerstellen. Dies hat Auswirkungen auf die Wärmebehandlung bzw. Erwärmung vor dem Walzen und auf den Warmwalzprozess selbst. Die jeweiligen Technologien müssen exakt auf die Erstarrungsverhältnisse abgestimmt sein. Nicht alle 3 Verfahrenswege sind aus qualitativen Gründen für alle Al-Legierungen geeignet.

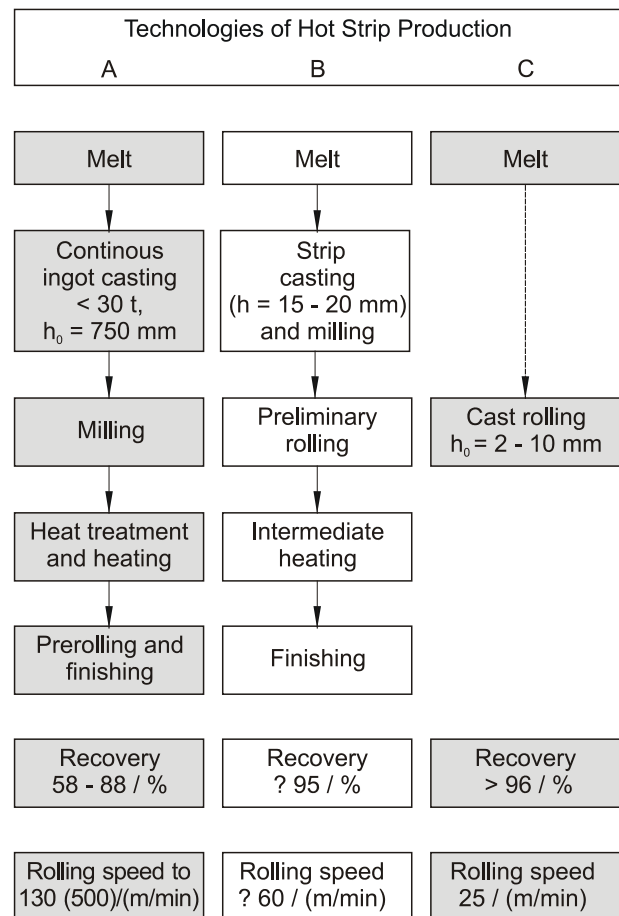


Bild 2. Verfahrenswege der Warmbandherstellung
Slika 2. Postupci tople proizvodnje traka

Für die Warmwalzung erweisen sich hydraulisch anstellbare Quartwalzwerke höher Steifigkeit (Federkonstante ~ 5 MN/mm) mit einem Arbeitswalzendurchmesser von 710 bis 900 mm besonders geeignet, die mit Walzspaltformregelsystemen (Axialverschiebung und hydraulische Rückbiegung der Arbeitswalzen) und einem Vielzonenkühlssystem zur differenzierten Walzguttemperatursteuerung sowie einer Walzenbürstvorrichtung ausgerüstet sind. Je nach Produktionsleistung werden Walzanlagen:

- mit einem Reversier - Vorwalzgerüst und einem Reversier - Fertigwalzgerüst zur Bund-zu-Bundwalzung bzw.;
- Halbkontinualwalzwerke mit reversierbarem Vorgerüst und einer mehrgerüstigen Tandemfertigwalzstraße benutzt.

Bei beiden Walzkonzepten unterliegt das Walzgut zwangsläufig unterschiedlichen Umformparametern, die für die Gefügebildung ausschlaggebend sind (Tabelle 4.). Dies muss bei der Festlegung der technologischen Fixwerte und der Stichpläne für die einzelnen Al-Legierungen angemessen berücksichtigt werden.

Tabelle 4. **Umformparameter beim Al-Warmbandwalzen** ($\vartheta_w = 300 - 550 \text{ }^\circ\text{C}$)
 Tablica 4. **Parametri oblikovanja pri toplom valjanju Al - traka** ($\vartheta_w = 300 - 550 \text{ }^\circ\text{C}$)

Walzweise	Umformgrad pro Stich φ_{st}	Umformgeschwindigkeit $\dot{\varphi} / \text{s}^{-1}$	Pausenzeit t_p / s	Umformzeit t_u / s
reversierend	0,15 - 1,0	0,5 - 60	5 - 200	$1 \cdot 10^{-2} - 5 \cdot 10^{-1}$
kontinuierlich	0,10 - 0,7	10 - 450	0,2 - 2	$1 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^{-2}$

KALTWALZ- / WÄRMEBEHANDLUNGSANLAGEN

Zur wirtschaftlichen Herstellung von Al-Bändern im Dickenbereich von 0,2 bis 5,0 mm für hohe und höchste Qualitätsansprüche sind spezielle Kaltwalzwerke in Quarto- und Sexto-Ausführung entwickelt worden, die für das Walzen mit Brems- und Vorwärtszug eingerichtet und meist für den Einwegbetrieb ausgelegt sind. Duowalzwerke werden gewöhnlich nur zum Walzen von Spezialprodukten, so u. a. für die Herstellung von Bändern in Glanzqualität, verwendet. Tandemwalzstraßen, bestehend aus 2 bis 5 Quarto- oder Sextowalzgerüsten, sind dagegen lediglich für eng begrenzte Walzprogramme bei hoher Produktionsleistung vorteilhaft. Technische Daten von Kaltwalzwerken der neuesten Generation sind in Tabelle 5. zusammengestellt.

Die Regelungssysteme bieten die Gewähr, die Normvorschriften bezüglich der Maßhaltigkeit und Planheit nicht nur einzuhalten, sondern nach noch schärferen Kriterien zu produzieren.

Bei den Wärmebehandlungen steht zwar die Beeinflussung der Festigkeitseigenschaften im Vordergrund, jedoch können auch die Anforderungen an die elektrische Leitfähigkeit, die Texturausbildung und die Korrosionsunempfindlichkeit sowie die Eignung für das dekorative Anodisieren eine Wärmebehandlung zwingend notwendig machen. Bei Reinaluminium und den naturharten AlMg-, AlMn- AlMgMn-, AlSi- Legierungen ist dies naturgemäß die rekristallisierende Glühung, bei den aushärtbaren

Legierungen auf AlCuMg-, AlZnMg-, AlZnMgCu- und AlMgSi- Basis darüber hinaus das Weichglühen und die Ausscheidungshärtung. Die gängigen Lieferzustände mit den Bezeichnungen O, H, W und T sind in der Norm DIN EN 515 festgelegt. Die jeweils erforderlichen Temperaturen und Glühzeiten lassen sich aus dem Legierungsgrad ableiten, müssen aber unbedingt auch die Art und Weise der thermisch-mechanischen Vorbehandlung berücksichtigen. Moderne Öfen ermöglichen eine flexible Temperaturregelung und die Einhaltung der Temperatur mit einer Genauigkeit von $< \pm 2,5 \text{ K}$ bei energetisch günstigen Bedingungen. In der Praxis durchgesetzt haben sich für die Rekristallisationsglühung satzweise beschickte Kammer- bzw. Haubenöfen, bei denen das Schutzgas intensiv umgewälzt wird, um durch erzwungene Konvektion eine schnelle und gleichmäßige Erwärmung zu sichern. Für partielle Rekristallisationsglühungen und für Ausscheidungshärtungen sind Durchziehglühöfen, speziell Schwebband- (Gas-jet-) Öfen, zweckentsprechender. In diese Anlagen sind Abschrecklinien, Anlassöfen, Biegerichtanlagen, Entfettungsbäder, chemische Behandlungslinie bis hin zu Lackierungseinheiten integrierbar, so dass ein vollständiger kontinuierlicher Produktionszyklus möglich wird.

Tabelle 5. **Technische Parameter moderner Kaltwalzwerke**
 Tablica 5. **Tehnički parametri moderne hladne valjaonice**

Durchmesser der Walzen: Arbeitswalzen $\geq 350 \text{ mm}$, Zwischenwalzen $\geq 460 \text{ mm}$, Stützwalzen $\leq 1320 \text{ mm}$
Spezifische Kennwerte: Walzkraft $F/b \leq 10 \text{ kN/mm}$ Bandzugkraft $F_u/b = F_w/b < 75 \text{ N/mm}$ Antriebsmoment $M/b \leq 0,15 \text{ kNm/mm}$ Leistung $P/b \leq 4 \text{ kW/mm}$ Gerüststeifigkeit $C_w \geq 7000 \text{ kN/mm}$ Walzgeschwindigkeit $v =$ bis 2000 m/min
Automatische Dickenregelung durch: Hydraulische Walzenanstellung, Bandzugregelung, Geschwindigkeitsregelung
Walzspaltformregelung durch: CVC - Technik, Walzenbiegung, Walzenverschiebung, Verschränken und Schwenken der Walzen, partielle Kühlung

VERSUCHSANLAGEN DES INSTITUTES FÜR METALLFORMUNG ZUR BANDHERSTELLUNG

Wie bei allen metallischen Werkstoffen sind auch bei Al-Legierungen die mechanisch-technologischen, physikalischen und chemischen Eigenschaften zwar durch die chemische Zusammensetzung der Legierung vorgeprägt. Sie werden je-

doch entscheidend durch die Struktur- und Gefügemerkmale des Fertigproduktes bestimmt. Maßgebend, welches Gefüge sich herausgebildet hat, ist nicht die letzte Behandlungsstufe, sondern die Verfahrensrouten, d. h. die technologischen Parameter in jedem Prozessabschnitt. Jede Umformung und Wärmebehandlung führt zu markanten Gefügeveränderungen. Um Produkte mit exzellenten Eigenschaften bzw. Eigenschaftskombinationen und hohem Gebrauchswert produzieren zu können, müssen die Technologien in jeder Stufe der Herstellung auf die spezifischen Werkstoffbelange und die herzustellende Endabmessung ausgerichtet sein. Je genauer diese Abstimmung gelingt, umso höher fällt die Produktqualität aus. Fortschrittstechnologien sind auf dieser Basis ausgelegt. Da eine Vorausbestimmung und Bewertung der zweckmäßigsten Technologieparameter auf der Grundlage rein theoretischer physiko-chemischer Gesetzmäßigkeiten nicht möglich ist, ist nach wie vor eine experimentelle Ermittlung auf Laboranlagen in Verbindung mit differenzierten Werkstoffprüfungen, metallografischen Gefügeuntersuchungen und Strukturanalysen unerlässlich. Das Institut für Metallformung hat sich dieser Problematik seit vielen Jahren zugewandt und seine Versuchsfelder laufend modernisiert und neu ausgerüstet. Investitionen der jüngsten Vergangenheit sind:

- das Multifunktionale GLEEBLE - Simulationssystem HDS-V40 (Bild 3.) zur Simulation und Prüfung von Erstarrungs-, mehrstufigen Umform- und Phasenumwandlungsvorgängen,
- die zur Bandwalzung umgebaute Conti-Walzversuchsanlage (Bild 4.), auf der Bänder mit > 1



Bild 3. GLEEBLE - Anlage
Slika 3. GLEEBLE - uredaj

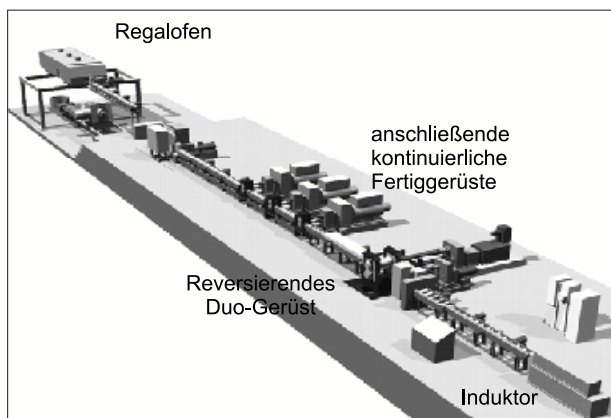


Bild 4. Kontroversuchswalzwerk für Warmbandwalzungen
Slika 4. Probna konti pruga za toplo valjanje traka

- mm und bis 110 mm Breite thermomechanisch gewalzt und temperaturgesteuert abgekühlt werden können,
- eine Blechprüfmaschine mit beheizbaren Werkzeugen, so dass Tiefziehoperationen und Umformbarkeitsbestimmungen bei Temperaturen bis über 300 °C vorgenommen werden können.

Zusammen mit den Warm- und Kaltwalzwerken und Plastometern, über die schon ausführlich an anderer Stelle [4 - 6] berichtet wurde, können alle Prozessstufen der Al - Herstellung unter industriellen Bedingungen durchgeführt und nach verschiedensten Aspekten allseitig analysiert werden. Gleichzeitig können alle Kennwerte zur Charakterisierung der Verfahren und des Werkstoffverhaltens sowie der Werkstoffeigenschaften (s. Tabelle 6.) ermittelt werden. Auf diese

Tabelle 6. Kennwerte zur Charakterisierung der Walzvorgänge, des Werkstoffverhaltens und der Eigenschaften
Tablica 6. Vrednovanje karakteristika postupaka valjanja, ponašanja materijala i svojstava

Verfahrenstechnische Randwerte: - Reibzahl μ - Wärmeübergangskoeffizient α / (W/m ²) bei direkter Berührung, freier u. erzwungener Konvektion und Strahlung
Thermophysikalische Eigenschaftswerte: ρ / (kg/m ³); c / (J/kg); λ / (W/m,K); $a = \frac{\lambda}{c \rho}$ / (m ² /s); h / (kJ/kg); $\varepsilon_{\text{str.}}$ / -
Umformtechnische Kennwerte: σ_F / (N/mm ²); $\sigma_{F-\text{max}}$ / (N/mm ²); $\frac{d\sigma_F}{d\varphi}$ / (N/mm ²); n - Wert / -
Termodynamische und kinetische Kennwerte der Gefügeevolution: Auflösung/Bildung von Ausscheidungen v_{los} ; v_{bild} / °C Kornwachstum Q_{KW} / (kJ/mol); Wachstumsexponent n_{KW} Erholung Entfestigungsgrad e_x / - Dynamische Rekristallisation Q_w / (kJ/mol); φ_{eff} / -; φ_{krit} / -; $X_{d-\text{rek}}$ / -; $D_{d-\text{rek}}$ / μm Statische Rekristallisation $Q_{st-\text{rek}}$ / (kJ/mol); t_{ink} / s; $X_{st-\text{rek}}$ / -; $D_{st-\text{rek}}$ / μm Korngröße D / μm
Mechanisch - technologische Werkstoffeigenschaften: E / (N/mm ²); $R_{p0.2}$ / (N/mm ²); R_m / (N/mm ²); Z / %; A_{gt} / %; A_{50} / %; n - Wert / -; r - Wert / -; Δr - Wert / -; I_E / mm; β_{max} / -; φ_{grenz} / -

Weise ist es möglich, theoretisch abgeleitete Beziehungen und Zusammenhänge durch Messergebnisse zu untermauern sowie vor allem auch mathematische Simulationsmodelle zu verifizieren und zu validieren. Ein komplexes mathematisches

es Modell, das alle verfahrenstechnischen und werkstoffwissenschaftlichen Aspekte beinhaltet, wurde bereits vor einiger Zeit erstellt [7, 8] und dient als Grundlage für laufende sowie in Aussicht genommene Forschungsarbeiten.

WERKSTOFFVERHALTEN / PRODUKTEIGENSCHAFTEN

Weiterentwicklung der Legierungen AA5xxx und AA6xxx

Für die Großserienfertigungen im Fahrzeugbau haben sich hauptsächlich die nichtaushärtbare Legierung AA5182 (AlMg_{4,5}Mn) für kompliziert geformte Karosserieinnenteile und die aushärtbare Legierung AA6016 (AlMg_{0,4}Si_{1,2}) für Karosserieaußenteile etabliert. In speziellen Fällen kommen auch die hochfesten Legierungen AA 7xxx (Al-Zn-Mg)- zur Anwendung, die vor allem auch im Flugzeugbau eingesetzt werden.

Als effektives Element zur Festigkeitssteigerung der nichtaushärtbaren Aluminiumlegierungen hat sich Magnesium erwiesen. Mg kann im Mischkristall bis zu sehr hohen Konzentrationen gelöst werden und wird durch die Mischkristallhärtung im weichen und umgeformten Zustand wirksam (Bild 5.).

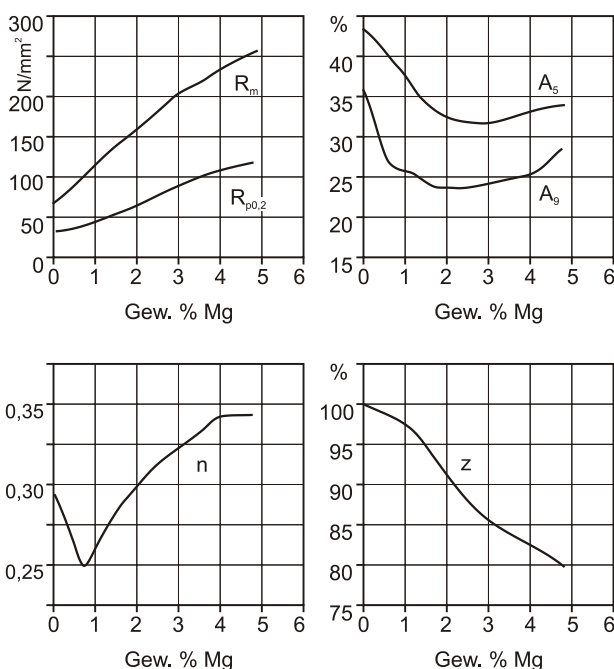


Bild 5. Einfluss des Mg - Gehaltes auf die mechanischen Kennwerte [2]
Slika 5. Utjecaj Mg - sadržaja na mehaničke vrijednosti [2]

Zusätze von Mangan bewirken darüber hinaus eine weitere Festigkeitssteigerung und Verbesserung der Korrosionsbeständigkeit.

Die Einsatzmöglichkeiten dieser Werkstoffklasse sind jedoch durch zwei Effekte eingeschränkt. Zum einen weisen diese Legierungen unstabiles Fließverhalten bei der Kaltumformung auf, das sich in Form von Fließfiguren des Types A und B an leicht umgeformten Bauteilen äußern kann. Zum anderen führt eine hohe thermische Belastung zu einem Erweichen des durch Umformung verfestigten Bauteils [16].

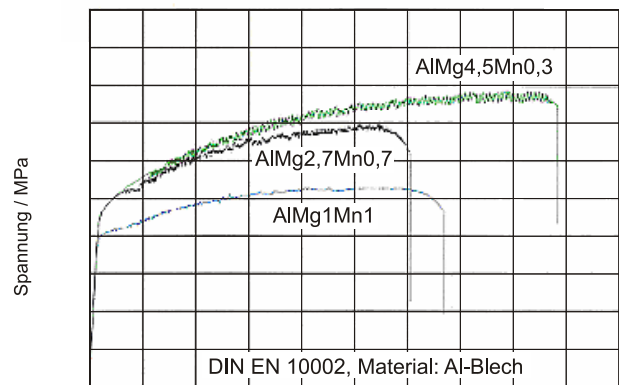


Bild 6. Fließfiguren bei nichtaushärtbaren Al-Legierungen [9]
Slika 6. Krivulje tečenja kod neočvrnutih Al- legura [9]

Diese Erscheinungen können legierungs- und fertigungstechnisch minimiert bzw. behoben werden. So kann durch Aushärtungseffekte die Erweichung des verfestigten Materials beim Einbrennlackieren verhindert werden. Die Festigkeit nach der Kaltumformung wird stabilisiert [12]. Bewährt hat sich das Zulegieren von geringen Mengen an Cu. Es wird bei den Temperaturen, die beim Einbrennlackieren herrschen, der Bake-Hardening-Effekt ausgelöst [13, 18]. Wichtige fertigungstechnische Voraussetzung ist, dass beim kontinuierlichen Glühen die Bänder schnell erwärmt und abgekühlt werden. Gegenüber den Legierungen der Serie 6xxx haben die AlMgCu-Legierungen den Vorteil der höheren Umformbarkeit, Falzbarkeit und des Crash-Verhaltens [15, 18, 19]. Außerdem kann die Lackierung bei niedrigeren Temperaturen und kürzeren Zeiten vorgenommen werden.

Bei der Verarbeitung der kaltgewalzten Bleche ist besonders darauf zu achten, dass es bei Legierungen mit mehr als 3 - 4 % Mg im Temperaturbereich von 60 - 200 °C zu Ausscheidungen der β - Phase (Al₈Mg₅) an den Korngrenzen kommen kann. Dadurch verschlechtern sich die Korrosionseigenschaften. Die Weiterentwicklung der aushärtbaren Legierungen (AA6xxx) bezieht sich auf die Werkstoff- und Technologieoptimierung. Schwerpunkte sind:

- Verbesserung der Beulsteifigkeit der Finalprodukte, um die Dicke der einzusetzenden Bleche reduzieren zu können,

- eine Verbesserung des Streck- und Tiefziehverhaltens, d. h. eine Minimierung der Rückfederung der Komponenten zur besseren Montage,
- Verringerung des Biegeradius, um die Falzbarkeit im teilweise vorverfestigten Material gewährleisten zu können,
- Verminderung der Oberflächenrauigkeit auf ein absolutes Minimum,
- Erhöhung der Korrosionsbeständigkeit der höherfesten Cu-haltigen AlMgSi-Legierungen.

Praktische Untersuchungen haben bestätigt, dass namentlich durch Absenkung des Mg-Gehaltes und/oder des Cu-Gehaltes das Crash-Verhalten beeinflusst werden kann.

Die Darstellung im Bild 7. gibt einen Vergleich im Crash-Verhalten der Legierungen wieder.



Legierung AA6181 A,
Rohr mit einer
Wanddicke von 1 mm

Weiterentwickelte Legierung,
Rohr mit einer
Wanddicke von 2 mm

Bild 7. Crash-Verhalten der aushärtbaren Legierungen [11]
Slika 7. Ponašanje očvrnutih legura pri splošavanju [11]

Anisotropie und Zipfelbildung

Wichtiger Qualitätsparameter von Aluminiumbändern hinsichtlich ihrer Tiefziehbarkeit ist neben dem Tiefziehvermögen (Grenztiefziehverhältnis) der Grad der Formänderungsanisotropie (r -Wert und Δr -Wert). Während der Δr -Wert, d. h. die planare Anisotropie, die Neigung zur Zipfelbildung charakterisiert, stellt der r -Wert (senkrechte Anisotropie) ein Maß für die Tiefziehfähigkeit dar. Im allgemeinen sollte der r -Wert beim Tiefziehen hoch sein. Bei den Aluminiumwerkstoffen werden im Vergleich zu Tiefziehstählen nur r -Werte von 0,6 bis 0,9 erreicht. Dies ist ursächlich durch die unterschiedliche Kristallstruktur und Texturausbildung bedingt. Bei Aluminiumwerkstoffen entsteht schon nach dem Warmwalzen eine ausgeprägte kubische Textur mit der Ausrichtung $\{100\}\langle 001\rangle$. Kennzeichnend hierfür ist die Ausbildung von 4 Zipfeln unter 0° und 90° zur Walzrichtung beim Tiefziehen. Nach dem Kaltwalzprozess ändert sich die Textur, und es entstehen vier Zipfel unter 45° zur Walzrichtung. Mit anderen Worten bedeutet dies, dass beim Kaltwalzen die Textur eine Umwandlung von der Warmwalztextur zur Kaltwalztextur

erfährt und der Δr -Wert ein Optimum durchläuft. In diesem Fall bilden sich nur schwache Zipfel oder im Idealfall überhaupt keine aus. Die Texturteilung hängt vom Werkstoff, dessen Rekristallisationsverhalten während der Warmumformung, den Kaltwalzbedingungen und der nachfolgenden Wärmebehandlung (Glühzeit, Glühzeit, Haltezeit) ab. Da technisch reines Aluminium während der Warmumformung fast nicht dynamisch rekristallisiert, kann das Optimum des Δr -Wertes beim Übergang der Kaltwalztextur zur Rekristallisationstextur durch zielgerichtete Glühung gefunden werden.

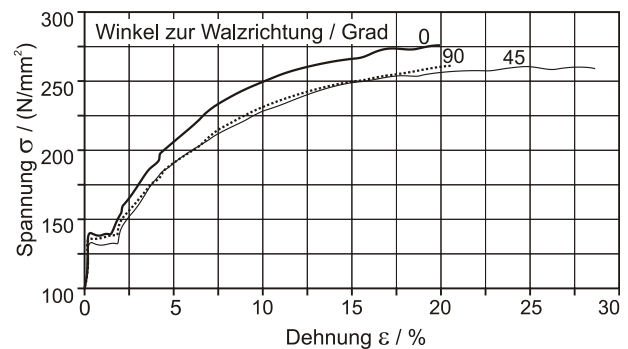


Bild 8. Spannungs - Dehnungs - Diagramm der Legierung AlMg5Mn - O

Slika 8. Dijagram napreznje - istežanje legure AlMg5Mn - O

Bei den meisten Blechwerkstoffen ist der Einfluss der Warmwalztextur auf die mechanischen Kennwerte bereits aus dem Zugversuch deutlich erkennbar. Es drückt sich dies in unterschiedlichen Werten für die Lüdersdehnung, die Fließfigurenausprägung, die Gleichmaßdehnung und die Festigkeitskennwerte aus (Bild 8.) [10].

Die planare Anisotropie steht in enger Abhängigkeit zu dem Kaltwalzgrad und der Technologie der Rekristal-

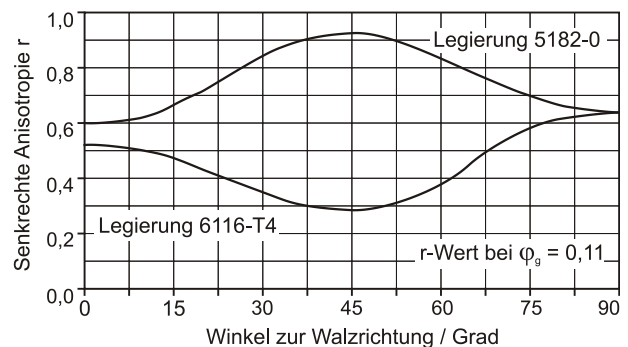


Bild 9. Einfluss der Probenlage zur Walzrichtung auf den r -Wert
Slika 9. Utjecaj probnog postrojenja na vrijednost r

isationsglühung. Mit steigender Kaltumformung wird die Textur stärker verändert und die planare Anisotropie nimmt ab. In Bild 10. ist die Veränderung des Δr -Wertes für ein Band aus Reinaluminium dargestellt.

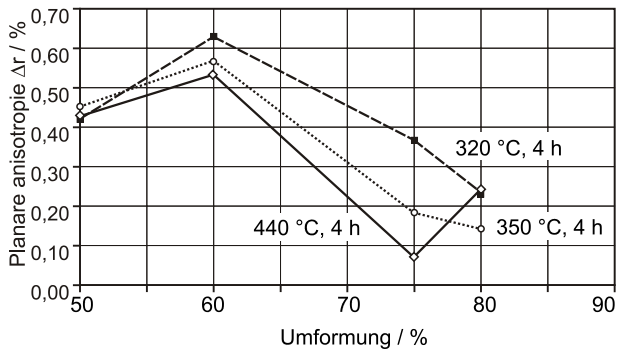


Bild 10. Abhängigkeit der planaren Anisotropie vom Kaltwalzgrad für AA1050 nach vorheriger Glühung
Slika 10. Ovisnost ravninske anizotropije o stupnju hladnog valjanja za AA1050 nakon prethodnog žarenja

Gleichzeitig wird die Zipfelbildung markant verändert. Bild 11. und 12. widerspiegeln, dass für den Kaltwalz-

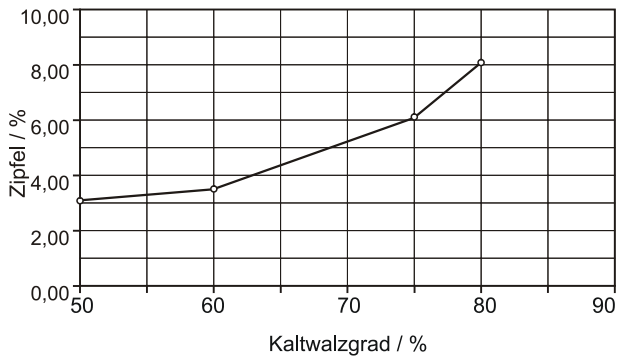


Bild 11. Zipfelbildung in Abhängigkeit vom Umformgrad nach der Kaltwalzung
Slika 11. Stvaranje ušiju u ovisnosti o stupnju deformacije nakon hladnog valjanja

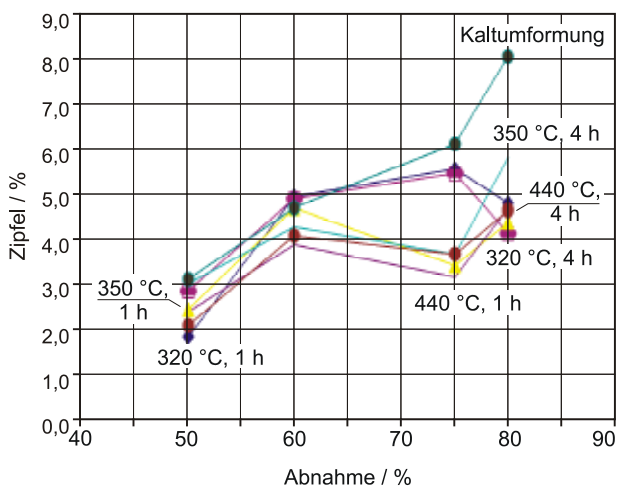


Bild 12. Zipfelbildung in Abhängigkeit vom Umformgrad nach der Kaltwalzung
Slika 12. Stvaranje ušiju u ovisnosti o stupnju deformacije nakon hladnog valjanja

prozess und die Rekristallisationsglühung die optimalen Technologieparameter gesucht werden müssen.

Der Grenzwert für die Zipfelgröße, der im allgemeinen mit < 3 % festgelegt ist, wird in den oben genannten Fällen am ehesten bei einer Kaltumformung von 50 %

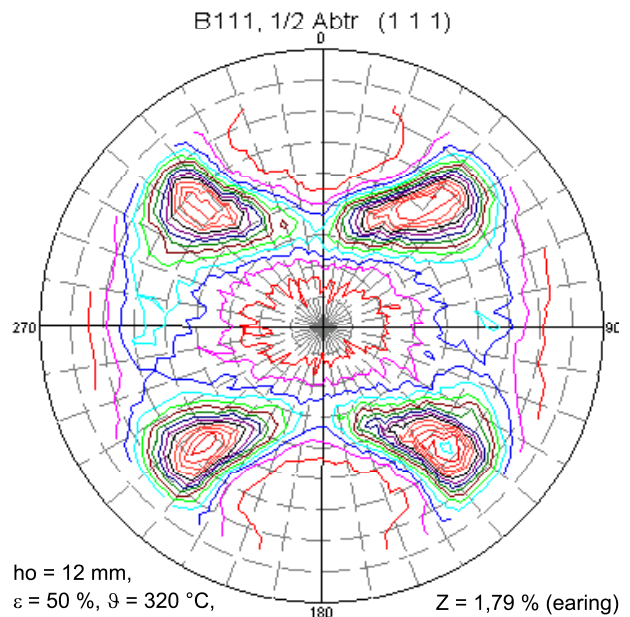
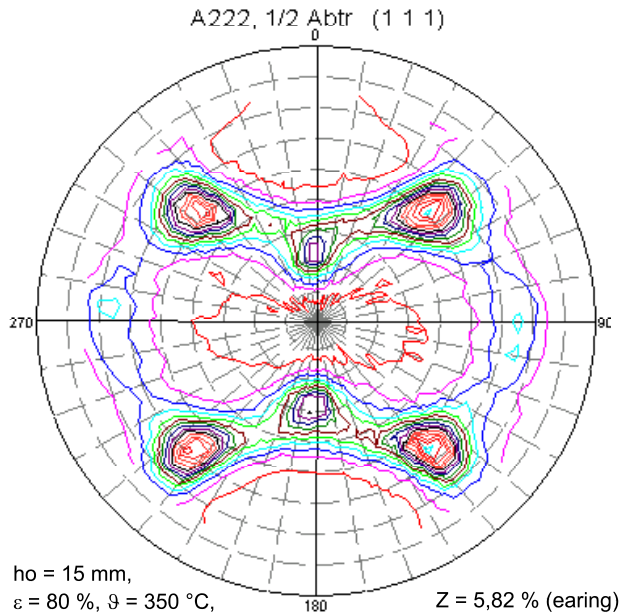


Bild 13. Polfiguren von der Legierung AA1050 mit hoher und niedriger Neigung zur Zipfelung
Slika 13. Polfigure nastale polovanjem legure AA1050 s većom i manjom sklonošću prema stvaranju ušiju

erzielt. Walz- und Rekristallisationstextur stehen in enger Wechselbeziehung. Das drückt sich deutlich bei einer Gegenüberstellung der Polfiguren und der Ergebnisse der Zipfelprüfung aus (Bild 13.).

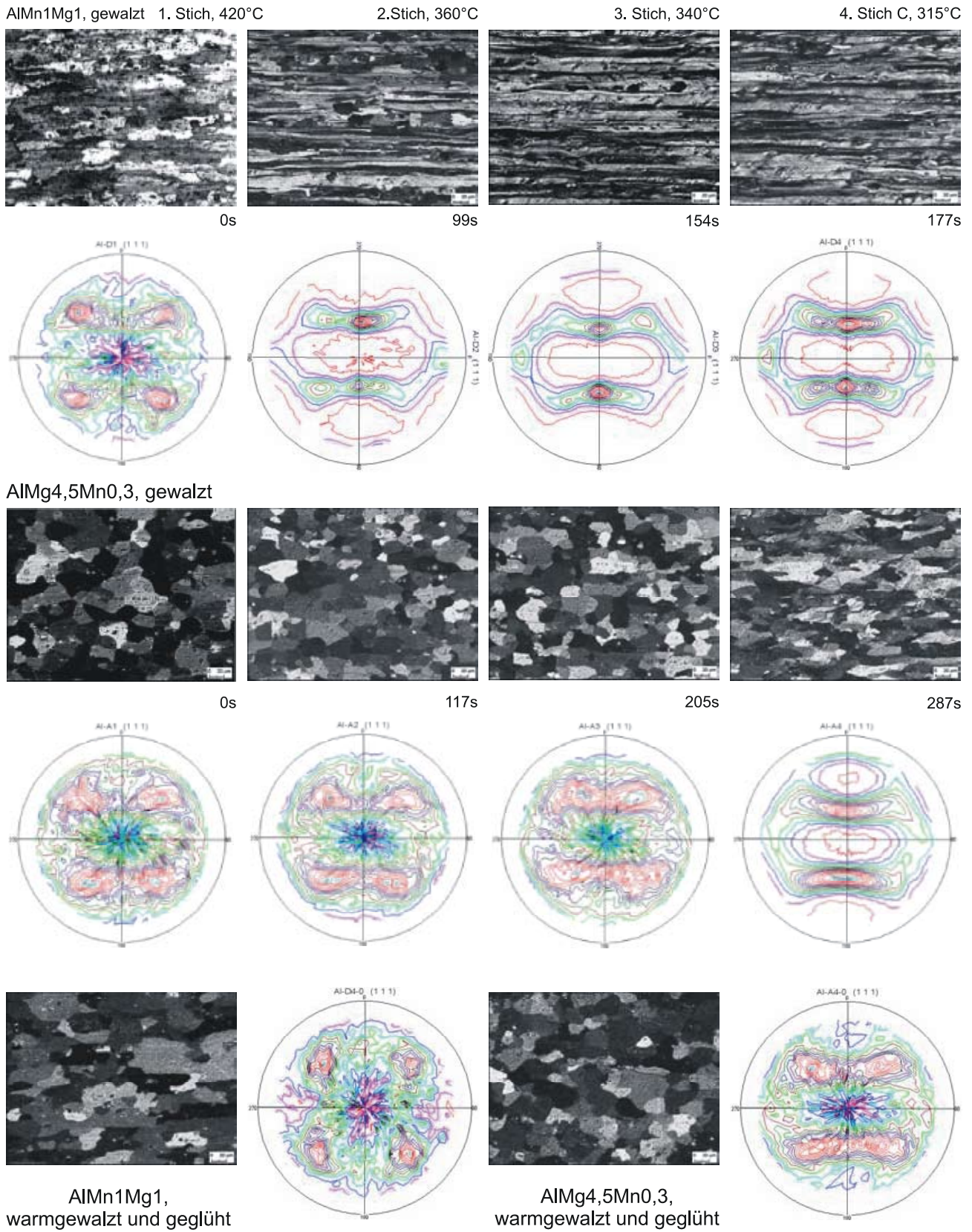


Bild 14. Gefüge und Texturentwicklung beim Warmwalzne
Slika 14. Razvoj strukture i teksture pri toplom valjanju

Bei technisch reinem Aluminium und einigen Aluminiumlegierungen bildet sich immer durch Rekristallisation eine Würfelform aus. Teilchenstimulierte Keimbildung der Rekristallisation führt hingegen zu einer Abweichung von der Würfelform. Durch sekundäre Feinausscheidungen bei der Rekristallisation kann die Wirkung der Primärausscheidungen unterdrückt werden. Das heißt, durch legierungstechnische und technologische Maßnahmen ist die Rekristallisationstextur zu beeinflussen. In der nachfolgenden Übersicht (Bild 14.) sind die Gefüge und Texturen, dargestellt durch Polfiguren, für Warmwalz- und geglähte Zustände der Legierungen AlMn1Mg1 und AlMg4,5Mn0,3 zusammengefasst. Das Material wurde von Hydroaluminium Bonn zur Verfügung gestellt.

Durch mathematische Modellierung der Texturentwicklung kann die gesamte Herstellungskette von der Warmwalzung bis zur finalen Wärmebehandlung bzw. bis zur Lackierung simuliert und hinsichtlich der Qualitätsparameter optimiert werden. Die Ergebnisse der eigenen Untersuchungen belegen, dass die Vorausbestimmung der Technologien nach werkstoff- und verfahrenstechnischen Aspekten unerlässlich und zwingend ist. Die computergestützte Prozessführung gewährleistet, hohe Produktqualitäten zu erzielen und den Anforderungen der Hersteller gerecht zu werden.

LITERATUR

- [1] N. N., Metall 59 (2005) 1-2, 58 - 60.
- [2] C. Kammer: Aluminium - Taschenbuch Bd. 1, 15. Auflage, Aluminium-Verlag, Düsseldorf 1999.
- [3] G. Drossel u. a.: Aluminium - Taschenbuch Bd. 2, 15. Auflage, Aluminium-Verlag, Düsseldorf 1999.
- [4] W. Lehnert, N. D. Cuong, M. Spittel, Metallurgija 37 (1998) 2, 57 - 66.
- [5] R. Kawalla, W. Lehnert, Metallurgija 39 (2000) 3, 131 - 138.
- [6] R. Kawalla, W. Lehnert, Metallurgija 43 (2004) 3, 169 - 179.
- [7] W. Lehnert, N. D. Cuong, Journal of materials processing technology 62 (1996), 567 - 574.
- [8] W. Lehnert, N. D. Cuong, Aluminium 76 (2000) 3, 150 - 154.
- [9] R. Kawalla, D. Hübgen, F. Blaut: Der Einfluss der Umformbedingungen auf den Gefügebau und die Eigenschaften von Aluminiumwarmband; Forschungsbericht, Institut für Metallformung, TU Bergakademie Freiberg 2004.
- [10] F. Ostermann: Anwendungstechnologie Aluminium, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1998.
- [11] B. Furrer: "Age hardening aluminium alloys for car body application" paper of the International Conference "New Developments in Sheet Metal Forming Technology", Stuttgart 2002, 381 - 396.
- [12] J. Hirsch: Aluminiumwerkstoffe für den Leichtbau, MEFORM 2000, Herstellung von Bändern und Blechen, 293 - 307.
- [13] D. Wieser, S. Keller, E. Brügger: "Non-Heat-Treatable Aluminium Materials for Automotive Application" paper of the International Conference "New Developments in Sheet Metal Forming Technology", Stuttgart 2002, 361 - 379.
- [14] N. N., Stabile Aluminiumkonjunktur 2004, Aluminium 80 (2004) 11, 1192 - 1193.
- [15] M. Katsukura: Recent Trends and Future Applications of Aluminium Alloys to Automobiles, Light Metal Age 4 (2001), 70.
- [16] Praktische Aspekte des Portevin-LeChatellier-Effektes, Aluminium 60 (1984) 9, 687.
- [17] Neue Aluminiumlegierungen für Karosseriebleche, Aluminium 63 (1987) 12, 1243.
- [18] Aluminiumkarosseriebleche der Legierungsfamilie AlMg(Cu), Aluminium 71 (1995), 289 - 470.
- [19] N. N.: Arbeitskreis Aluminium-Karosseriebleche, Deutschland.