

DFG-Projekt Schm-746/52-3

## **Simulation der Lokalisierung und des Portevin-Le-Chatelier-Effekts auf der Grundlage zellulärer Automaten und des Relaxationselementeverfahrens**

Projektbeginn: 01.01.2008

Projektende: 30.06.2009

### **Ziele**

Das Ziel des geplanten Projekts ist die Entwicklung eines Modells zur Simulation der Bildung der Deformationslokalisierung durch den Portevin-Le-Chatelier-Effekt (PLC) und der Materialschädigung auf der Grundlage der Methode der zellulären Automaten und der Relaxationselemente. Die Zielerreichung ist mit der Indifizierung der Mechanismen zur Bildung von Meso- und Makrobandstrukturen bei der Verformung des Materials Al6061 und deren Einfluss auf die weiteren Deformations- und Schädigungsprozesse sowie der Möglichkeiten der gezielten Steuerung der Bildung der Deformationslokalisierung verbunden.

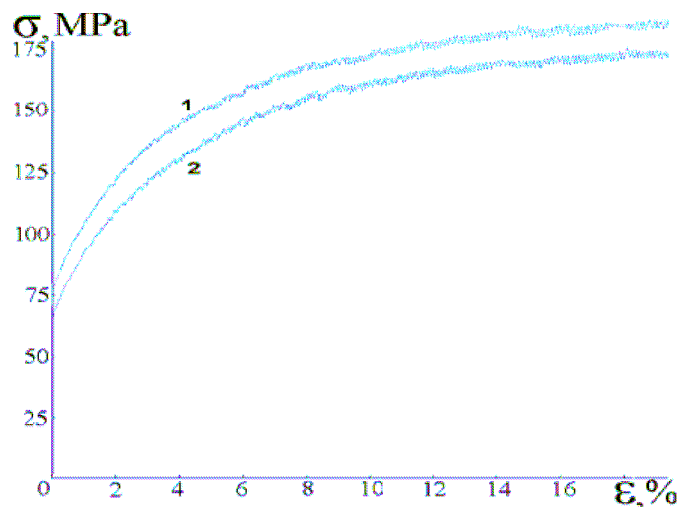
Dadurch lassen sich Computerexperimente durchführen, die es erlauben, das mechanische Verhalten realer heterogener Materialien mit unterbrochenem Fließen zu erhalten. Dies wird es ermöglichen, geometrische und mechanische Charakteristiken der Strukturelemente und den Prozess der Bildung von Bandstrukturen zu steuern, den verspannten, deformierten Materialzustand zu allen Zeitpunkten der äußeren Zugbelastung zu berechnen, die Bereiche der optimalen Verformungszustände vorausszusagen und letzten Endes die Struktur und die Eigenschaften der Materialien mit dem Effekt des unterbrochenen Fließens (PLC-Effekt) zu verstehen und zu beeinflussen.

### **Stand der Forschung**

In letzter Zeit rufen die Effekte der Deformationslokalisierung als Beispiele der Selbstorganisation und des Verhaltens von ungeordneten Strukturen in nichtlinearen Systemen, die weit vom Gleichgewicht entfernt sind, das besondere Interesse der Forscher hervor.

Von besonderem Interesse an dem Problem ist, dass mit der Instabilität der plastischen Deformation das Auftreten von verschiedenen Anomalien mechanischer Eigenschaften verbunden ist und die Instabilitäten selbst ein Ergebnis von Übergangsprozessen im dynamischen Verhalten des zu deformierenden Materials sind.

Das unterbrochene Fließen, welches auf Belastungsdiagrammen zu beobachten ist (Bild 1), spiegelt die Tatsache wider, dass sich die Schwankungen der Instabilität der plastischen Deformation vom Mikro- bis zum Makromaßstab entwickeln. Deswegen ist die Bestimmung der Mechanismen zur Entstehung der makroskopischen Deformationslokalisierung von besonderem Interesse.



**Bild 1:** Spannungs/Dehnungskurve der Legierung: 1 - Al-22% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ; 2 - Al-10% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Die traditionellen Modelle für Berechnungen der Spannungs/Dehnungszustände in Festkörpern unter Belastung können für die Simulation und die Analyse der inneren Mechanismen der Deformationslokalisierung der Legierungen, welche Partikel einer zweiten Phase bzw. Poren und Mikrorisse enthalten, nicht verwendet werden, da sie die starken Spannungsgradienten und -konzentrationen auf verschiedenen Maßstabniveaus nicht berücksichtigen.

### Relaxationselementeverfahren

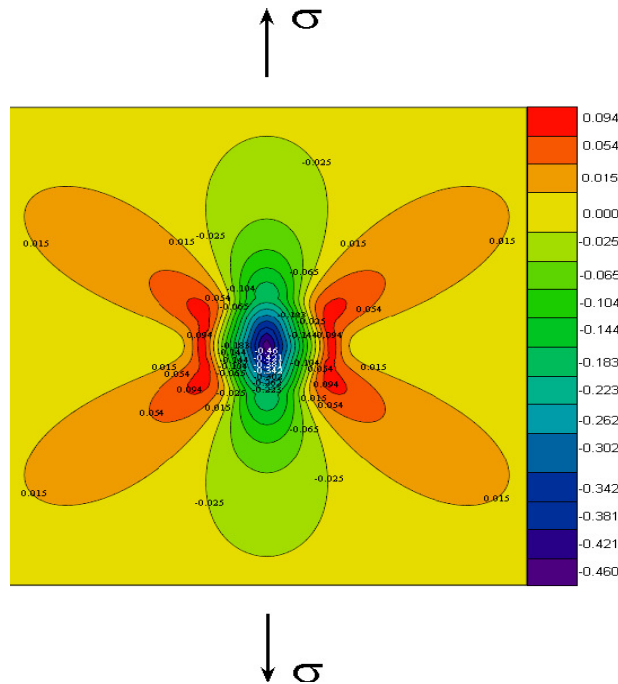
Das Relaxationselementeverfahren (REV) ist eine neuartige, modifizierte Version der Zellulare-Automaten-Methode (ZAM) für die Beschreibung von mechanischen Eigenschaften des Mediums, die nicht diskret, sondern kontinuierlich vorliegen. Das REV erlaubt die quantitative Beschreibungen der Prozesse der Verformung von Bereichen lokaler plastischer Verformungen und das Abschätzen von Gradienten und Konzentrationen der Spannungen in örtlichen Zonen polykristalliner und einkristalliner Metalle und Legierungen. Es basiert auf der Idee, die plastische Verformung als reinen Relaxationsprozess zu betrachten. Jeder elementare Vorgang der plastischen Verformung ist in Übereinstimmung mit dem elementaren Vorgang der Spannungsrelaxation in dem betrachteten Element.

Als Ergebnis erscheint außerhalb des vorgegebenen Elements ein inhomogenes Spannungsfeld und dieses beeinflusst die Reihenfolge der plastifizierenden Elemente der Struktur im Verlauf der plastischen Verformung. Die physikalischen Prinzipien, die der Simulationmethode zu Grunde liegen, ermöglichen es, die Selbstorganisation der Bandstrukturen und die Gesetzmäßigkeiten der Entwicklung der Deformationslokalisierung, die bei Experimenten zu beobachten sind auch in den berechneten Modellpolykristallen zu erhalten.

## Ergebnisse

Die erste Version des Modells der Ausbreitung von PLC-Bändern wurde für PLC-Bänder vom Typ A (gekennzeichnet durch regelmäßige Spannungseinbrüche unter das allgemeine Spannungsniveau) erstellt.

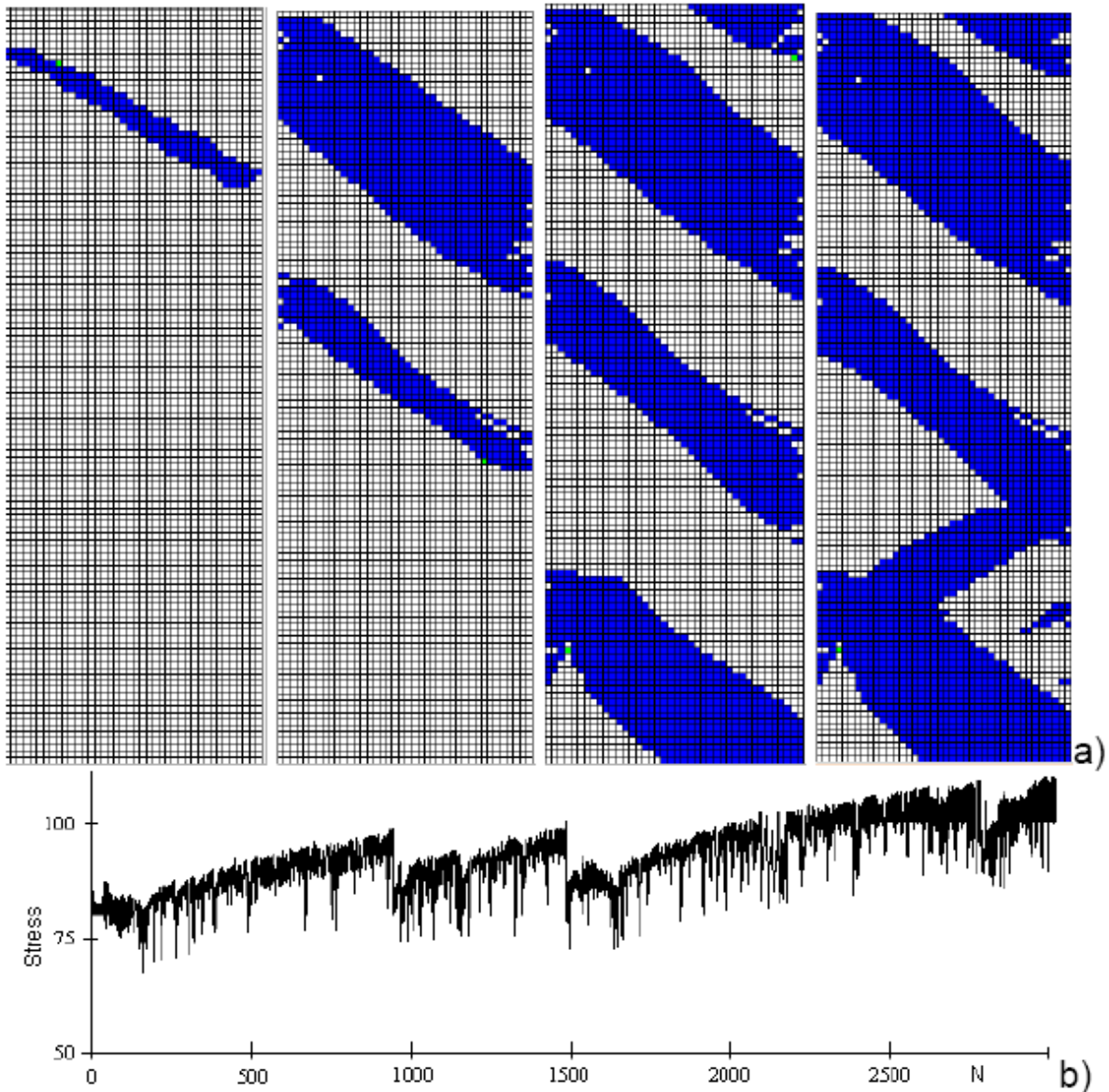
Bild 2 stellt das Schubspannungsfeld eines einzelnen Kornes eines Polykristalls dar, das bei äußerer Belastung als Ergebnis des Kornübergangs vom elastischen in den plastisch deformierten Zustand entsteht.



**Bild 2:** Die Konturlinien der Schubspannung  $\sigma_{xy}/\sigma$  eines Relaxationselements

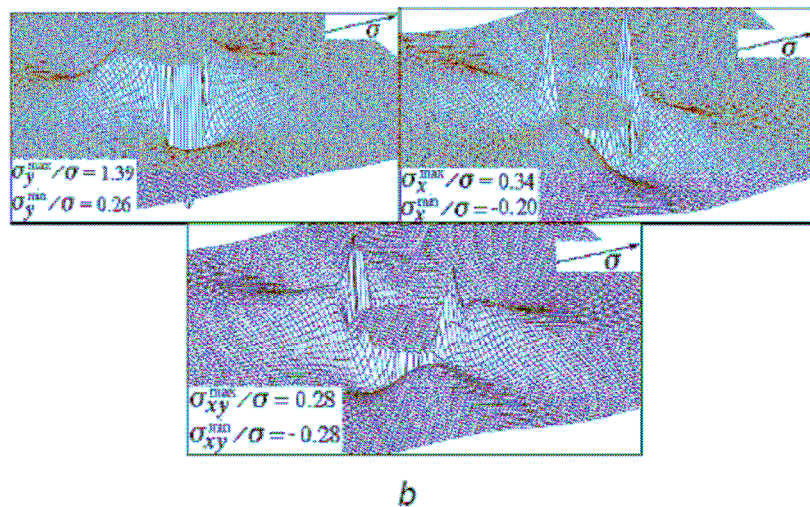
Das Bild der Konturlinien zeigt erhöhte Spannungen entlang der Richtung der um 45° zur Zugbelastungsachse geneigten Bereiche als aus kontinuumsmechanischen Rechnungen folgt. Die Richtungspfeile stellen die Richtung der Zugbelastung dar.

Die Ausbreitung der Bänder vom Typ A erfolgt auf Grund der Ausbreitung der plastischen Verformung von Korn zu Korn entlang der Front des Bandes (Bild 3). Der Prozess des Übergangs entlang der Front geschieht unter abnehmender äußerer Spannung. Die weitere Ausbreitung des Übergangs beginnt unter höheren durchschnittlichen beaufschlagten Spannungen. Die Endversion des Modells soll Randeffekte und Kraftmomente berücksichtigen, die unter Ausbildung und Ausbreitung der Verformungsbänder unter lokalisierter Schubbeanspruchung entstehen. Ein Parameter wird in das Modell eingeführt, der den Zeitpunkt bestimmt ab wann neue strukturelle Elemente in die plastische Verformung einbezogen werden. Der entscheidende Wert ist die Schubspannung  $\tau_{cr}$  entlang der 45°-Richtung bezüglich der Zugbeanspruchung, die unter bestimmten externen Spannungen erreicht wird. Die plastische Verformung weiterer Elemente im Modell beeinflusst das Spannungsfeld in der Nachbarschaft der Körner. Aus diesem Grund findet die Selbstorganisation der Verformungslokalisierung in Form der Ausbreitung von Bändern lokalisierter plastischer Verformung statt.



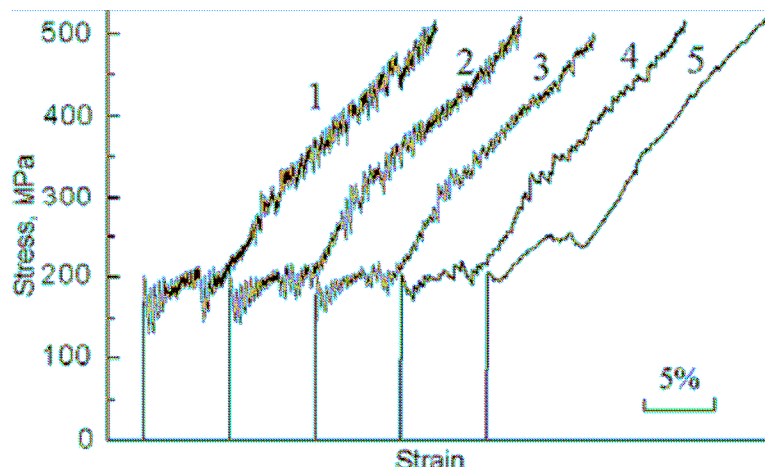
**Bild 3:** Entwicklung der Dehnungskonzentrationen in einer Al(6061)-Matrix (a) und die Abhängigkeit der Spannung von der Anzahl der bereits plastifizierten Körner (b).

Zur Berücksichtigung (vorgesehen für die später Phase des Projektes) eines Einflusses der Spannungen der harten  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Einschlüsse auf den Charakter der PLC-Band-Ausbreitung wurde als erster Schritt das Spannungsfeld eines harten Einschlusses in der Aluminium-Matrix berechnet: Im Rahmen dieses Projektes wurden die Spannungs/Dehnungsfelder einer isotropen Platte mit kreisförmigem Einschluss unter äußerer Zugbeanspruchung berechnet. Die Ergebnisse sind in Bild 4 dargestellt.



**Bild 4:** Verteilung des Spannung  $\sigma_y$  (a),  $\sigma_x$  (b) und  $\sigma_{xy}$  (c) in einer Aluminiumplatte mit einem kreisförmigen  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Einschluss.

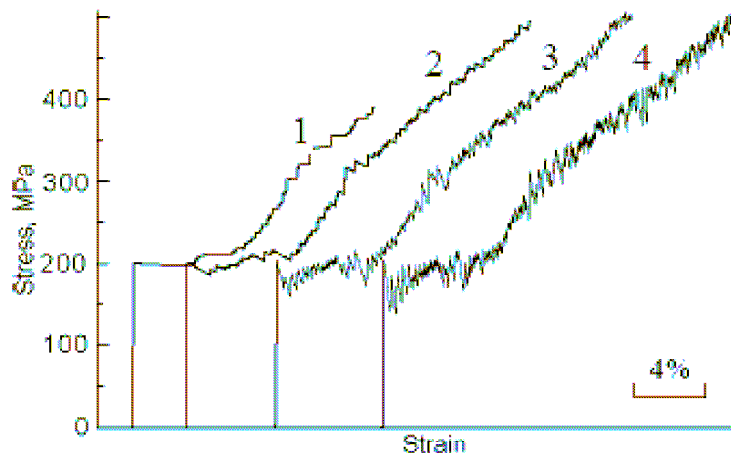
Die Berücksichtigung der angewandten Dehnungsrate auf den Verlauf der sägezahnförmigen Kurve ist in Bild 5 dargestellt.



**Bild 5:** Die Einfluss der Geschwindigkeit  $v_0$  der Prüfmaschine auf den Typ des Spannungs/Dehnungsdiagramms:  $v_0$ , mm/s = 0.001 (1), 0.01 (2), 0.02 (3), 0.03 (4), 0.04 (5).

Je niedriger die Geschwindigkeit der Prüfmaschine, desto kleiner ist die Amplitude der Schwankungen auf der Spannungs/Dehnungskurve.

Der Einfluss der Steifigkeit der Prüfmaschine auf das Spannungs/Dehnungsdiagramm des Schmiedeeisens mit einem E-Modul von 210000 MPa ist in Bild 6 dargestellt.



**Bild 6:** Einfluss der Steifigkeit der Prüfmaschine auf unterschiedliche Spannungs/Dehnungs-Diagramme von Schmiedeeisen.

Im Falle einer weichen Zugprüfmaschine ( $M = 1.3 \times 10^2 \text{ kN/mm}$ ) hat die Spannungs/Dehnungskurve einen stufenartigen Verlauf. Wenn die Steifigkeit  $M$  der Prüfmaschine von  $1.3 \times 10^2$  bis  $1.3 \times 10^8 \text{ kN/mm}$  zunimmt, hat die Kurve einen mehr sägezahnförmigen Verlauf. Es tritt ein Spannungsabfall nach Erreichen der Streckgrenze auf und dieser nimmt sogar zu und die Amplitude der Spannung steigt. Alle Kurven haben ein Fließplateau, nach dem eine Phase der Kaltverfestigung eintritt. Dies wird verursacht durch die Steigung des inneren Spannungsfelds der Relaxationselemente. Das Fließplateau wird verursacht durch den Mechanismus der Lüdersbandausbreitung, wenn die Körner in die plastische Verformung einbezogen und nach und nach alle Körner im Arbeitsbereich der Probe plastisch deformiert werden. Bei höheren Spannungen findet eine mehrfache wiederholte Beteiligung der plastifizierten Körner in der weiteren plastischen Verformung statt.

### Veröffentlichungen aus diesem Projekt

1. Ye.Ye. Deryugin, G.V. Lasko, S. Schmauder, Modelling and simulation of the localized plastic deformation by relaxation element method, *Comput Mech* (2006) available online first <http://dx.doi.org/10.1007/s00466-006-0141-x>
2. Ye.Ye. Deryugin, G.V. Lasko, S. Schmauder, Field of stresses in an isotropic plane with circular inclusion under tensile stress, online proceedings of the Conference on Damage in Composite Materials 2006, 18-19 September, Stuttgart, Germany, available at [www.ndt.net](http://www.ndt.net)
3. G.V. Lasko, Ye.Ye. Deryugin, S. Schmauder, Simulation of the Evolution of Band Structures in Polycrystals on the Basis of Relaxation Element Method and Cellular Automata, *Lecture Notes in Computer Science*, 4173 (2006) 367-372.
4. Ye.Ye. Deryugin, V.E. Panin, G.V. Lasko, S. Schmauder, Simulation of mesomechanics of intermittent yielding in polycrystals by the relaxation element method, *Physical Mesomechanics* 9, Special issue (2006) 21-24.
5. Ye.Ye. Deryugin, G.V. Lasko, S. Schmauder, Modelling of Mesomechanics of Portevin-Le Chatelier Effect by Relaxation Element Method, *Proc. Int. Conf. "Inter-*

national Conference on Computational & Experimental Engineering and Sciences  
3-8 January 2007 (ICCE07), 1707-1713.

6. Ye.Ye. Deryugin, V.E. Panin, S. Schmauder, B.I. Suvorov, Investigation of local characteristics of intermittent flow of disperse-hardened aluminium as multilevel system, Physical Mesomechanics 9, N5 (2006) 27-32.
7. Ye.Ye. Deryugin, S. Schmauder, B.I. Suvorov, G.V. Lasko, Investigation of local characteristics of intermittent flow of disperse-hardened aluminium (submitted).

### **Danksagung**

Die Untersuchungen werden von der Deutschen Forschungsgemeinschaft unter Schm-746/52-3 gefördert. Für die finanzielle Unterstützung sei gedankt.

### **Ansprechpartner**

Dr. Galina Lasko

Tel: +49/711 685 62559

Fax: +49/711 685 62635

E-mail: [Galina.Lasko@mpa.uni-stuttgart.de](mailto:Galina.Lasko@mpa.uni-stuttgart.de)